

**Национальная академия наук Украины
Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного**

Б.А. ТРОШЕНЬКИН

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГИЯ

В 2-Х ЧАСТЯХ

ЧАСТЬ I

**ТЕРМОДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА.
ОКЕАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Харьков
Издательство “ФОРТ”
2003

УДК 551.551+551.583+621.311.21(26)+621.483(26)

ББК 31.55

Т-76

Рецензенты:

А.Л. Шубенко, доктор технических наук, профессор, зав. отделом оптимизации процессов и конструкций турбомашин ИПМаш НАН Украины;

В.П. Шанорев, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой химической техники и промышленной экологии Национального технического университета “ХПИ”.

Рекомендовано к печати ученым советом Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного (протокол № 4 от 9 июля 2003 г.)

Трошенькин Б.А.

Т-76 Возобновляемая энергия. В 2-х частях. — Ч. 1 — Термодинамика атмосферы и океана. Океанические электростанции. — Национальная академия наук Украины. Ин-т пробл. машиностроения им. А.Н. Подгорного. — Х.: Изд-во “Форт”, 2003. — 104 с.

ISBN 966-02-3053-2

ISBN 966-02-3054-0 (Ч. 1)

ISBN 966-7097-88-9

С момента своего появления развитие Солнечной системы и, в частности, Земли происходит в строгом соответствии с законами термодинамики. Эти законы диктуют поведение океанских вод, земной коры и живой природы. В монографии на основе *i*-термодинамики раскрыто влияние океанических и атмосферных течений на скорость вращения Земли, дано объяснение древним наводнениям и оледенениям, установлен химический состав атмосферы в период образования месторождений угля, нефти и газа. Определены места расположения океанических электрических станций, не нарушающих климат на Земле. Обоснованы наиболее эффективные способы извлечения природной энергии. В свою очередь, μ -термодинамика открыла возможность оценки скорости формирования земной коры и связанных с ней периодов извержений вулканов и землетрясений. Сейсмические зоны, как правило, соответствуют источникам геотермального тепла. Дан анализ циклов энергоустановок, использующих тепло Земли.

Расчитана на специалистов, занимающихся энергетикой и физикой Земли, а также любителей геофизики, обладающих серьезной подготовкой. Может быть полезна студентам вузов.

УДК 551.551+551.583+621.311.21(26)+621.483(26)

ББК 31.55

ISBN 966-02-3053-2

ISBN 966-02-3054-0 (Ч. 1)

ISBN 966-7097-88-9

© Трошенькин Б.А., 2003

© Издательство “Форт”,
оригинал-макет, 2003

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга составлена на основе лекций, читаемых автором в Национальном техническом университете “ХПИ”, по курсу “Экологические проблемы нетрадиционной энергетики”. Структура лекций предполагает наличие у слушателей определенных знаний по физике и желания исследовать окружающий нас мир.

Автор приглашает студентов, вооружившись законами преобразования энергии как путеводителем, совершить увлекательную экскурсию в просторы океана и атмосферы, в глубины земных недр. Для полноты знаний в программу экскурсии включено посещение Юпитера и Марса.

Знакомство с теоретическими основами природных процессов подкрепляется сведениями о результатах испытаний опытных моделей и примерами расчетов, основная часть которых взята из ранее опубликованной автором монографии “Циркуляционные и пленочные испарители и водородные реакторы”.

Предполагается, что по возвращении из путешествия экскурсанты достаточно хорошо подготовлены и могут самостоятельно определить зоны расположения возобновляемых источников энергии.

Далее им предстоит познакомиться с наиболее эффективными способами извлечения этой энергии, не нарушающими экологического равновесия окружающей среды.

При рассмотрении процессов в литосфере студенты узнают о закономерностях размещения источников геотермального тепла и их энергетическом использовании. Привлечено также внимание слушателей к последствиям бесконтрольной эксплуатации земных недр.

Автор надеется, что тот же путеводитель будет полезен специалистам, работающим в различных областях наук о Земле.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам лаборатории “Альтернативные и возобновляемые источники энергии” Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины за советы и участие в проведении ряда экспериментов, а также рецензентам и редакторам.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- D — диаметр аппарата, м
Φ — диаметр трубы, м
L — длина, м
H — высота, м
δ — толщина, приращение длины, м
Π — периметр, м
F — площадь, м²
f — площадь сечения, удельная поверхность, м²
τ — время, с
G — массовый расход, кг/с
V — объемный расход, м³/с
M — масса, кг; молярная масса, кг/моль
m — плотность орошения или объемный расход жидкости, отнесенный к единице длины периметра поперечного сечения теплопередающих труб, м³/(м • с) или кг/(м • с)
υ — скорость, м/с
x — массовое паросодержание
β — расходное объемное газосодержание
φ — истинное объемное газосодержание
E — абсолютный брызгоунос, м³/с; энергия активации
μ_и — коэффициент истечения
θ — угол смачивания, град
p — давление, Па
Δp — сопротивление канала течению потока, Н/м²
t — температура, °C
Δt — температурный напор, °C
T — температура, K
R — газовая постоянная, Дж/(кг K); радиус, м
G_i — энергия Гиббса, Дж
K — константа равновесия
μ — химический потенциал или удельное химическое сродство, Дж/кг;
динамический коэффициент вязкости, Па • с
ν — кинематический коэффициент вязкости, м²/с; стехиометрический коэффициент
i — энтальпия, Дж/кг
h — изменение энтальпии, Дж/кг

г — теплота парообразования, Дж/кг
S — энтропия, Дж/(кг · °C)
η — коэффициент полезного действия (КПД)
Q — тепловой поток, Вт
q — плотность теплового потока, Вт/м²
α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · °C); доля прореагировавшего вещества или глубина разложения вещества
W — скорость газовыделения, м³/(кг · с), м³/(м² · с)
k — константа скорости, коэффициент
ε — термическое сопротивление, м² · °C/Вт
λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C)
c — теплоемкость, Дж/(кг · °C)
ρ — плотность, кг/м³
σ — поверхностное натяжение, кг/м
g — ускорение свободного падения, м/с²

Индексы

L — жидкость
G — газ
см — смесь
i — условия с внутренней стороны стенки
e — условия с внешней стороны стенки
p — стенка
ср — среднее значение
кр — критическое значение
з — заданное значение
тр — трение
max — максимальный
min — минимальный
и — истечение
п — приведенный
D — диффузия
C — концентрация
Штрих — величина относится к жидкости
Два штриха — величина относится к пару

ВВЕДЕНИЕ

С момента своего появления развитие Солнечной системы и, в частности, Земли, происходит в строгом соответствии с законами термодинамики. Эти законы диктуют поведение океанских вод, атмосферы, земной коры и живой природы.

Между тем, в большинстве исследований отсутствует анализ энергетических характеристик наблюдаемых земных процессов. Последнее обстоятельство сдерживает решение ряда практических задач. Главной из них является обеспечение надежного снабжения промышленности сырьем и энергией. Как известно, развитие цивилизации привело к серьезному истощению природных ресурсов и загрязнению окружающей среды. Таких последствий можно было бы избежать в случае освоения возобновляемых источников энергии и сырья.

Цель данного исследования — проследить путь энергетических преобразований на Земле и выявить условия использования возобновляемой энергии и сырья.

Внимание, в первую очередь, привлекают энергия океанских течений и воздушных потоков, а также температурный градиент между слоями воды в океане.

Как известно, Мировой океан занимает 71 % поверхности Земли и, следовательно, воспринимает основной поток лучистой энергии Солнца. Благодаря равновесию между поглощением солнечной радиации, с одной стороны, и длинноволновым излучением поверхности моря, а также испарением, с другой, обеспечивается постоянство термического состояния морей. Это состояние характеризуется тем, что поверхностные воды океана в тропических и субтропических районах прогреваются до 25–30 °С, в то время как на глубине 400–500 м вода находится при температуре 4–10 °С. Данный температурный перепад можно использовать для выработки энергии.

В этой связи возникает проблема оценки допустимых пределов освоения этой энергии, не нарушающих установившегося на Земле экологического равновесия.

Следует также определить места расположения океанических электростанций (ОЭС) и комбинатов по производству промышленной продукции на базе вырабатываемой ОЭС электроэнергии.

Кроме того, предстоит овладеть способами регулирования температуры поверхностного слоя океана плавающими ОЭС, что позволит предотвратить возникновение бурь и ураганов.

Решению перечисленных задач посвящена первая часть данной монографии.

Другим не менее важным источником возобновляемой энергии является тепло Земли. Как известно, общий фон тепловых выделений создают радиоактивные вещества, рассеянные в толще Земли. Но для таких энергоемких процессов, как землетрясения и перемещения материков, необходимы дополнительные источники энергии. Представляется, что виновником столь значительных событий могут быть реакции, происходящие на глубине в несколько сот километров. Наиболее вероятными среди них являются реакции окисления ряда основных земных элементов.

В ходе реакций часть химической энергии преобразуется в механическую, затрачиваемую на перемещение слоев Земли, а другая выделяется в виде тепла. Таким образом, знание скорости подземных реакций открывает возможность прогнозирования периодов землетрясений.

Как правило, зонам высокой сейсмичности соответствуют геотермические зоны, аккумулирующие тепло реакций.

Хотя большинство очагов глубинного тепла хорошо изучено, но все же экологические последствия их эксплуатации скважинным методом на сегодняшний день недостаточно ясны.

Примерно та же ситуация складывается при массовом извлечении полезных ископаемых из недр Земли.

Здесь также необходима энергетическая оценка происходящих в природе изменений.

Тот же анализ позволяет утверждать, что месторождения угля, нефти и газа являются теми вехами, по которым можно судить о переходе Земли как материальной системы из одного энергетического состояния в другое. Причем эти переходы сопровождаются изменением состава атмосферы, что приводит, в свою очередь, к усилению или ослаблению парникового эффекта.

Эти вопросы рассмотрены во второй части книги.

Остановимся на методах решения поставленных задач.

В основе принятых методов лежит представление о том, что любой естественный процесс на Земле управляется, в конечном счете, законами термодинамики.

Коснемся процесса естественной циркуляции потоков. Явление естественных циркуляций, выраженное энергетически, сводится к принципу Карно. Именно возникновение естественной циркуляции приводит к росту энтропии в указанных процессах, т. е. к их необратимости. Рассматривая обратимый термодинамический цикл этого явления, удастся установить

основные закономерности течения потоков в различных средах. При этом оказалось, что ускорение потоков при испарении воды с поверхности океана, в результате чего Земле передается импульс силы, целиком зависит от изменения энтальпии среды.

Для простоты изложения материала раздел исследований, связанный с фазовыми превращениями в атмосфере и океанах, назван нами i -термодинамикой (где i — энтальпия среды).

Раздел физики “ i -термодинамика” дает объективные объяснения закономерностям циркуляции водных и воздушных потоков, расширяет наши знания о вековых колебаниях климата и дает некоторые представления о первоначальных этапах развития Земли. Особенностью процессов, затрагиваемых i -термодинамикой, является то, что химический состав участвующих в нем веществ не изменяется.

Термодинамическая теория приобретает логически законченный вид при распространении ее положений на системы переменного химического состава. Так, при взаимодействии веществ в земных недрах наблюдаются, с одной стороны, физико-механический процесс естественной циркуляции потоков, а с другой — физико-химические явления, связанные с перестройкой электронных оболочек реагирующих компонентов.

Термодинамический метод позволяет определить: энергетическую возможность и направление химических превращений, сопровождающие реакции тепловые изменения; устойчивость образующихся соединений; максимальные равновесные концентрации продуктов реакции и предельный их выход; оптимальный режим процесса (температуру, давление и концентрации реагирующих веществ). Причиной реакций является термодинамическая неустойчивость системы, состоящей из различных веществ. Мерой этой неустойчивости служит свободная энергия, высвобождаемая во время реакции. В обратимом изотермическом процессе эта энергия равна по абсолютной величине и обратна по знаку максимально полезной работе. К последней относится вся произведенная в ходе процесса работа, кроме работы расширения.

В отличие от случая фазовых превращений для описания поведения систем с переменным химическим составом оказалась более приемлемой μ -термодинамика (где μ — химический потенциал, введенный Дж. Гиббом при оценке равновесия гетерогенных веществ [1]).

Метод μ -термодинамики обратимых процессов вносит некоторую ясность в оценку мощности подземных очагов тепла, позволяет определить энергетические затраты при землетрясениях и извержениях вулканов.

Как при фазовых, так и при химических превращениях используемые методы не содержат физического параметра времени. Время как параметр состояния системы обнаруживает реальную направленность от прошлого к будущему в необратимых и непрерывно совершающихся процессах взаимодействия систем, обладающих различными температурой, давлением, концентрацией или химическими потенциалами. Направление времени, которое совпадает с возрастанием энтропии каждой системы, изолированной от окружающей среды, мы называем будущим, по определению [2]. Пока есть физические и химические градиенты, существует также и градиент времени. С исчезновением перечисленных градиентов исчезает и время как физический параметр эволюции контактирующей системы.

Градиенты как движущие силы поддерживаются в окружающей среде двумя источниками энергии: Солнцем и экзотермическими реакциями в глубинах Земли. Идеальный обратимый цикл передачи тепла с экватора к полюсам состоит из нескольких этапов, каждому из которых соответствуют свои потери энергии, переводящие цикл, в конечном счете, в разряд необратимых. В результате трения кинетическая энергия потоков, движущихся с определенной скоростью, вновь преобразуется в теплоту, воспринимаемую окружающей средой.

Оценки сопротивления водных и воздушных масс течению потоков проводят по эмпирическим формулам, установленным экспериментально. Время осуществления реального цикла складывается, таким образом, из времен протекания отдельных процессов.

Из изложенного следует, что оценка времени наступления того или иного события в атмосфере или океане на данном этапе развития физики носит полуэмпирический характер.

Примерно такая же ситуация сложилась с методами расчета систем переменного состава, присущим литосфере. Более того, для этих систем не существует четкой связи между скоростью течения потоков и скоростью взаимодействия веществ. Прерывистость (дискретность) материи позволяет частицам компонентов каждой системы располагаться в пространстве по определенным законам и реагировать в определенный интервал времени. Этот интервал определяет формальные зависимости, описывающие процесс.

Использование зависимостей формальной кинетики само по себе свидетельствует о слабом развитии методов термодинамики необратимых процессов. Иными словами, принцип наименьшего рассеяния энергии, берущий свое начало, по-видимому, от принципа наименьшего действия в механике, еще недостаточен для составления строгих аналитических зави-

симостей. К тому же рассматриваемый принцип справедлив лишь для систем с незначительным отклонением параметров от условия равновесия.

Между тем, довольно обширный экспериментальный материал свидетельствует о тесной связи скорости фазовых и химических превращений с величиной располагаемого химического потенциала. Это позволило в расчетах μ -термодинамики установить ряд соотношений для систем, сравнительно удаленных от состояния равновесия. Таким образом, появилась возможность при рассмотрении процессов в литосфере углубить отдельные положения термодинамики необратимых процессов.

Течение водных и воздушных потоков невозможно рационально объяснить без знания законов их распределения и циркуляции в атмосфере и океане. Под словом “распределение” подразумевают некоторую упорядоченность потоков в пространстве, а под словом “циркуляция” — регулярность прохождения отдельных элементов потоков мимо фиксированных зон Земли. Исследование состояния океана сводится, по сути дела, к поиску пространственной симметрии водных структур и периодичности явлений в этих структурах. В расположении потоков преобладают билатеральная (зеркальная), поворотная и переносная симметрии. Теоретическая модель циркуляции водных масс в океане с ровным дном и покрывающем, по предположению, всю поверхность Земли, определяется общими законами механики. В действительности же материки и острова вносят значительные отклонения в идеальную картину распределения потоков. Для оценки степени отклонения от законов симметрии проведен анализ распределения и циркуляции потоков на Юпитере.

Обмен количеством движения между теплыми течениями и Землей и передача этого количества движения холодным потокам так или иначе связаны с изменением скорости вращения Земли вокруг своей оси.

Представляет определенный интерес исследование закономерностей циркуляции потоков на ранней стадии развития Земли. Как известно, вращающиеся жидкие тела сплющиваются у полюсов. Так, например, имеется разность между полярным и экваториальными диаметрами Земли. Эта разница возникла еще в то время, когда Земля была в жидком состоянии.

Циркуляция потоков на расплавленной Земле, по-видимому, мало чем отличалась от сегодняшней. Поэтому изложение материала, касающегося образования материков в период остывания Земли, проводится также на основе i -термодинамики. При этом принимались во внимание элементы “симметрии” и “асимметрии” в структуре потоков.

Но Земля — довольно массивное небесное тело, для раскрутки которого (при отсутствии гор) недостаточно механической энергии, получае-

мой в ходе перераспределения низкопотенциального тепла. Последнее обстоятельство приводит нас к событиям давно минувших дней — к моменту образования Земли. В этой связи проведена приближенная оценка первоначального крутящего момента Земли. Оценка базируется на теории, выдвинутой В. Амбарцумяном, и предположениях С. Хокинга как наиболее полно отражающих основные принципы термодинамики [3, 4].

Применение геометрических принципов уместно и при рассмотрении процессов в литосфере. В этом случае расположение и высота горных хребтов несут в себе информацию о силе и направлении естественной циркуляции потоков в глубинах Земли. Но методы исследования при этом смещаются в сторону использования химических потенциалов как движущих сил процессов.

Изучение закономерностей кристаллизации веществ в остывающих потоках открывает возможности оценки распределения полезных ископаемых в недрах Земли.

Для достижения полноты получаемых результатов проведено сравнение основных характеристик процесса извержения вулканов на Земле и ранее прошедших извержений вулканов на Марсе.

Меру неупорядоченности потоков в ряде случаев связывают с представлением о конфигурационной энтропии, введенной в кинетическую теорию газов. Тогда уменьшение беспорядка в распределении потоков сопровождается уменьшением энтропии.

Как известно, физические законы в равной мере соблюдаются как в природных, так и в искусственно создаваемых условиях. Поэтому среди технических устройств всегда можно найти образцы изделий, процесс в которых протекает аналогично тому или иному природному процессу. Особенно подходящими для сравнения являются испарительные установки, циркуляция потоков в которых возникает при крайне низких температурных напорах.

Метод сравнений прост и надежен. Более того, ряд спонтанно возникающих в атмосфере и океанах процессов поддается расшифровке лишь на основе предварительных термодинамических расчетов с последующей проверкой выводов на лабораторных, пилотных и промышленных стендах. Несколько отличны от предыдущих экспериментальные методы исследования процессов, протекающих в литосфере. Из опытного оборудования здесь оказались необходимы электротермические печи и химические реакторы высокого давления. Предварительно для имитации природных процессов был разработан ряд сплавов и соответствующих им оксидных систем.

В монографии затронута также проблема образования нефти и газа. С этой целью использованы биологические системы, в частности, водород-окисляющие бактерии. Испытание биологического реактора позволило установить кинетические характеристики процесса преобразования неорганических компонентов и углекислого газа в органическую массу. Кроме того, уточнены некоторые представления о термодинамике живых систем.

Справедливости ради следует отметить, что развиваемые здесь методы расчета природных процессов являются приближенными, поскольку термодинамика указывает лишь на наиболее вероятный путь развития событий, но не исключает их иных маршрутов.

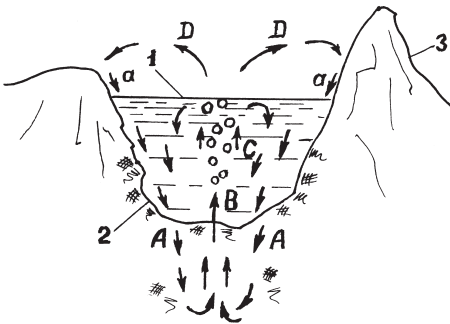
ЕСТЕСТВЕННАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ПОТОКОВ

Рассмотрим процесс естественной циркуляции потоков как в природных, так и в искусственно создаваемых условиях.

1.1. ЦИРКУЛЯЦИЯ ПОТОКОВ В ГЕОТЕРМАЛЬНОМ ОЗЕРЕ

Предположим, среди гор находится озеро, питаемое теплой водой (рис. 1). Исследуем устойчивость слоев воды по отношению к силам, вызывающим естественную циркуляцию потоков. Практическое значение данного исследования — получить исходные данные для проектирования геотермической электростанции и, в частности, скважин для извлечения горячей воды.

Математическое описание гидродинамической неустойчивости в горном озере можно рассматривать как упрощенную модель процессов в литосфере. Но главная цель изучения циркуляции — разработать аналог,



1 — озеро; 2 — дно озера; 3 — горы; А — поток холодной воды, поступающий в недра Земли; В — поток горячей воды из недр Земли; С — парожидкостный поток в центре озера; D — поток пара, поднимающийся в атмосферу; а — поток дождевой воды, стекающий в озеро.

Рис. 1. Схема потоков в природном озере

в сравнении с которым проще установить закономерности движения потоков в атмосфере и Мировом океане.

В обычных условиях в горном озере наблюдается слабая естественная циркуляция. Но в случае поступления в озеро перегретой воды (стрелка В) происходит ее вскипание. Создается высокоскоростной подъемный поток (стрелка С), резко интенсифицирующий циркуляцию воды. Пары вскипания поднимаются вверх в атмосферу, конденсируют и в виде дождя или горных ручьев возвращаются в озеро (стрелка а). Охлажденный поток циркулируемой воды (стрелка А) вновь опускается на дно озера. Зрительное восприятие происходящего приводит нас к простой мысли о том, что появление пузырьков пара в жидкости снижает плотность среды в подъемном канале. (Границами канала являются неподвижные слои жидкости). В результате вес столба парожидкостной смеси в подъемном канале оказывается меньше веса столба чистой воды в опускном канале, что, казалось бы, и является движущей силой естественной циркуляции.

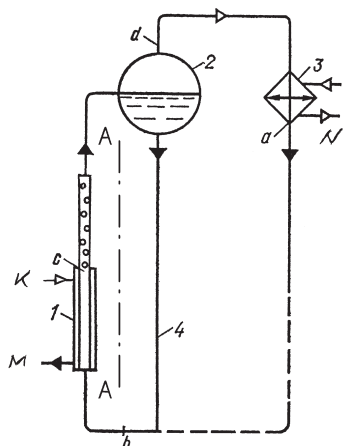
И все же столь очевидная картина циркуляции не является достаточно корректной. Изложенные представления о процессе относятся к несжимаемым жидкостям. С появлением в системе пара объяснение наблюдаемых закономерностей переходит из области гидродинамики в область газовой динамики. Покажем недостатки гидродинамической модели на примере расчета естественной циркуляции потоков в испарительной установке.

1.2. ИСПАРИТЕЛЬ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ПОТОКОВ

Начнем с того, что понятие “плотность среды в подъемном канале” не имеет физического смысла. Эту плотность нельзя измерить, так как в подъемном канале существуют две среды — пар и жидкость. Плотность жидкости в контуре изменяется незначительно, поэтому образование пузырей в подъемном канале не может существенно нарушить гидростатическое давление столба жидкости. В свою очередь, плотность пара оказывается выше в зоне закипания, чем над поверхностью озера.

Более точную физическую модель можно сформулировать следующим образом: движение среды в контуре с естественной циркуляцией вызывается расширением пара при перепаде давления, действующим в начале и конце канала вскипания. Этот перепад возникает в результате преобразования части тепловой энергии, передаваемой из земных недр в атмосферу, в механическую энергию сжатого пара. Созданный таким образом движущий напор в стационарных условиях равен сумме гидравлических сопротивлений всех участков контура и потерь на ускорение рабочей среды.

При расчете испарителей методом последовательных приближений прежде всего следует определить количество располагаемой энергии. На рис. 2 представлена схема испарительной установки.



1 – обогреваемый канал; 2 – сепаратор; 3 – конденсатор; 4 – опускающей канал; а – выход конденсата в опускающую трубу; б – нижнее колено циркуляционного контура; с – зона закипания раствора; d – выход пара в конденсатор; К – пар; М – конденсат; N – вода; AA – плоскость симметрии циркуляционного контура.

Рис. 2. Схема циркуляционного контура испарителя

Представление о масштабах используемых промышленных установок дает рис. 3. На снимке видны шестикорпусные испарительные установки, предназначенные для производства пресной воды. Производительность каждой установки — 120 тыс. м³ в сутки.

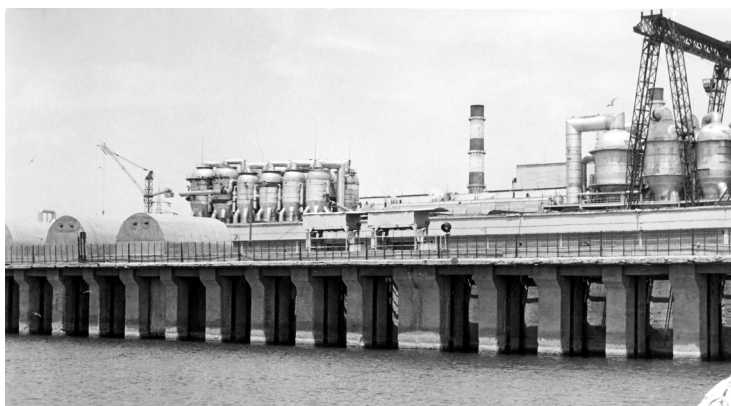


Рис. 3. Внешний вид шестикорпусных испарительных установок для производства пресной воды (фото Новикова Е.П., г. Шевченко)

1.2.1. Анализ испарительного цикла

Цикл установки в системе координат $T-S$ для случая, когда зона кипения раствора вынесена из нагревательной камеры, показан на рис. 4. Цикл объединяет четыре процесса: $a-b$ — адиабатное повышение давления в опускном канале под действием гравитации (при крайне незначительном увеличении температуры жидкости), $b-c$ — нагревание раствора в камере при незначительном снижении давления, $c-d$ — адиабатное расширение вторичного пара в подъемном канале (изоэнтропный процесс); cz — расширение пара с потерей энергии на трение (политропный процесс); sp — дросселирование потока в подъемном канале (изотальпийный процесс); da — конденсация вторичного пара в конденсаторе 3 (изобаро-изотермический процесс).

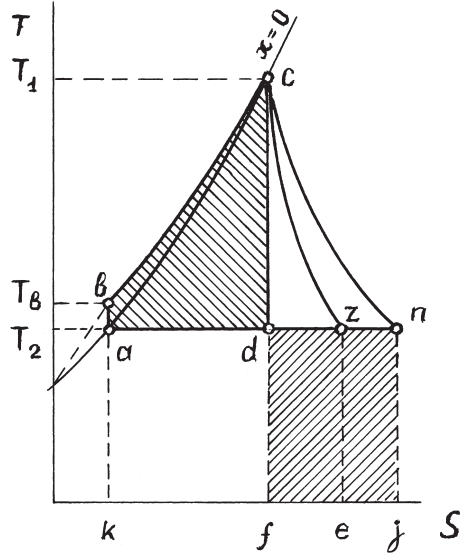


Рис. 4. Цикл испарительной установки с естественной циркуляцией потоков в системе координат $T-S$

Увеличение температуры в процессе сжатия потока настолько мало, что практически точки a и b сливаются в одну точку. Поэтому цикл можно называть треугольным. Кривая $x = 0$ (нижняя пограничная кривая) отделяет область воды от области насыщенного пара.

Теплота q_1 , сообщаемая раствору в процессе $a-b$ и $b-c$, показана площадью $abcdkfa$ и находится по формуле $q_1 = i_c - i_a$. Теплота q_2 , отдаваемая вторичным паром в конденсатор (площадь $adfka$), вычисляется по зависимости $q_2 = i_d - i_a$. При этих условиях теплота, превращенная в идеальном цикле в работу (площадь $abcd$), составит $q_1 - q_2 = (i_c - i_a) - (i_d - i_a) = i_c - i_d = h$.

Термический КПД реального цикла установки определяется по формуле

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{i_c - i_d}{i_c - i_a} = \frac{h}{i_c - i_a}.$$

При рассмотрении цикла испарительной установки принималось, что в подъемном канале происходит адиабатное расширение пара без внутренних потерь (обратимое). В действительности этот процесс вследствие внутренних потерь является необратимым. Условный график необратимого процесса показан на рис. 4 наклонной линией cz . Полный цикл при необратимом расширении занимает на диаграмме площадь $abczda$. КПД этого цикла определяется по формуле

$$\eta_{tz} = \frac{q'_1 - q'_2}{q'_1}.$$

Теплота q'_2 , отдаваемая в процессе za в конденсатор, представлена площадью $zeka$. Поскольку площадь $adika$ меньше площади $zeka$, то $\eta_{tz} < \eta_t$. КПД реального цикла

$$\eta_{tz} = \frac{i_c - i_z}{i_c - i_a} = \frac{h_z}{i_c - i_a}.$$

Отношение термического КПД η_{tz} цикла при необратимом расширении пара к термическому КПД η_t цикла при обратимом расширении называется внутренним относительным КПД:

$$\eta_{o.e} = \frac{\eta_{tz}}{\eta_t} \text{ или } \eta_{tz} = \eta_{o.e} \cdot \eta_t.$$

В подъемном канале жидкость перемещается от первоначального уровня в зоне закипания до уровня в сепараторе с преодолением действия силы тяжести. Кроме того, двухфазный поток получает ускорение, и, таким образом, совершается полезная работа.

Лишь только в изоэнтальпийном процессе дросселирования сп поток не получает ускорения. В этом случае площадь $rijdn$, представляющая количество образующегося в результате трения тепла, численно равна площади $scabc$, соответствующей количеству тепла, которое могло бы перейти в работу в адиабатном процессе cd .

Во время дросселирования энтропия потока достигает своего максимального значения.

В первом приближении можно принять внутренний КПД $\eta_{o.e}$ подъемного канала равным КПД эргазлифта. Для эргазлифтов с каналами, близкими по своим размерам к каналам испарителей, этот КПД колеблется в пределах $\eta_{o.e} = 0,1 \div 0,3$ [5]. Расчетные значения h , η_t и $\eta_{o.e}$ позволяют перейти к газодинамическому расчету. Для этого используется диаграмма цикла в системе координат $p-V$ (рис. 5).

Для обратимого цикла работа, затрачиваемая в контуре на циркуляцию потока, равна площади $abcd$, определяемой как разность площади $1bcda21$ и площади $2ab12$, представляющей собой работу гравитационного поля в опускном канале. Процесс адиабатного сжатия на диаграмме $p-V$ представлен изохорой ab .

Уменьшение работы сжатия при полной конденсации пара объясняется тем, что жидкость практически несжимаема, и поэтому вся затрачиваемая при сжатии работа сводится к работе ее проталкивания. А так как удельный объем жидкости невелик, то и работа проталкивания, равная $(p_1 - p_2)V_a$, будет мала.

В нагревательной камере температура воды повышается, что приводит к увеличению ее объема (процесс bc). В результате изменения плотности возникает так называемая сила Архимеда, обеспечивающая слабую циркуляцию потоков еще до вскипания воды. Для этого режима течения площадь $abca$ должна быть примерно равна площади $a21ba$.

Интенсивная циркуляция потоков устанавливается в условиях вскипания воды. Для политропного процесса площадь $abcza$ отличается от площади $a21ba$ на величину потерь энергии в контуре, соответствующих площади $czdc$.

Полезная работа пара в канале вскипания $h_z = \eta_{o.e} h$, где h — работа вторичного пара при обратимом расширении. Значения h могут быть вычислены также по зависимости $h = \frac{v_d^2 - v_c^2}{2}$, где v_d — скорость течения парожидкостной смеси при адиабатном обратимом расширении; v_c — скорость жидкости перед зоной закипания. Отсюда $v_d = \sqrt{2h + v_c^2}$; в действительном цикле $v_z = \sqrt{2\eta_{o.e} h + v_c^2}$.

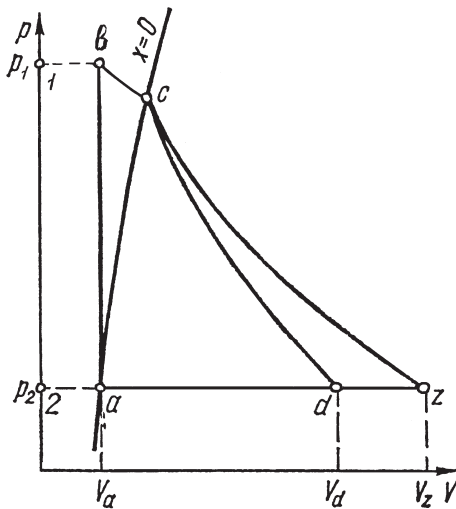


Рис. 5. Цикл испарительной установки с естественной циркуляцией в системе координат $p-V$

Далее, располагая найденной скоростью течения парожидкостной смеси, для конкретного аппарата следует уточнить сечения каналов, оценить структуру потока, определить гидравлические сопротивления элементов контура. После уточнения величины перегрева жидкости следует вновь рассчитать количество располагаемой энергии и сравнить его с затрачиваемым.

Полезная работа, совершаемая вторичным паром в подъемном канале, в конечном счете должна быть равна работе гравитационного поля в опускном канале. При выпаривании раствора с определенной теплоемкостью, от которой зависит положение кривой $x = 0$ на диаграммах $T-S$, повышение термического КПД происходит с возрастанием начального давления p_c и снижением конечного давления p_z . Высокие давления p_c соответствуют более высоким контурам. В этом случае удается повысить температуру T_1 перегрева раствора, что увеличивает располагаемый теплоперепад.

При постоянной тепловой нагрузке снижение высоты контура приводит к смещению зоны кипения в нагревательную камеру. При этом площадь, ограниченная циклом, сокращается и термический КПД принимает меньшие значения.

Такого же результата можно достичь увеличением при неизменной высоте контура количества тепла, передаваемого из нагревательной камеры в конденсатор.

Некоторое представление о возможности варьирования значений внутреннего и термического КПД дают испытания трехкамерной модели испарителя с восходящей пленкой. Аппарат состоял из трех вертикальных труб с диаметром $\Phi_c 25 \cdot 10^{-3}$; $38 \cdot 10^{-3}$; $57 \cdot 10^{-3}$ м, заключенных в отдельные греющие камеры. Длина принималась 7 м, а трубок $\Phi_c 57 \cdot 10^{-3}$ м — 7 и 9 м. В верхней части исследуемые трубки были присоединены к одному сепаратору, в нижней — к одной растворной камере.

Такая конструкция аппарата позволяла производить как совместное, так и раздельное испытание труб. Испытания показали, что при давлении выше атмосферного лучшие показатели были у трубок меньшего диаметра. Но с увеличением вакуума и снижением температурного напора до 10°C теплопередача в трубке $\Phi_c 25 \cdot 10^{-3}$ м была значительно ниже трубок $\Phi_c 57 \cdot 10^{-3}$ м и $\Phi_c 38 \cdot 10^{-3}$ м. Следовательно, снижение упругости водяного пара приводит к уменьшению внутреннего КПД циркуляционного контура. Положение можно исправить, если заменить рабочее тело газлифта — водяной пар на пар легкокипящих жидкостей. Так, если вводить в нижнюю

часть нагревательной камеры бензол, изопрен, хлороформ или другую, не смешивающуюся с раствором жидкость, то скорость циркуляции резко возрастет [6]. Объясняется наблюдаемый эффект более высокой упругостью паров перечисленных жидкостей по сравнению с парами воды при равных температурных условиях.

В свою очередь, повысить значения термического КПД можно не только за счет увеличения высоты циркуляционного контура, но и изменяя интенсивность гравитационного поля. Так, циркуляция, например, жидкого водорода на массивных планетах будет происходить с более высокой скоростью, чем на Земле.

Основные закономерности процесса циркуляции становятся более очевидными при рассмотрении примера расчета циркуляционного контура.

1.2.2. Расчет контура в первом приближении

Для конкретного аппарата задаются начальные условия. Предположим, что принят аппарат с вынесенной зоной кипения, высота подъемного канала — 2 м. Температура вторичного пара в сепараторе $t_2 = 100$ °С, скорость течения раствора на входном участке теплопередающих труб $v_c = 0,5$ м/с. Учитываются свойства продукта.

По этим данным вначале определяется гидростатическое давление по высоте аппарата, затем — гидродинамическое. С учетом температурной депрессии раствора и гидродинамического давления определяется температура жидкости в зоне закипания. Допустим, что в момент закипания продукт имеет температуру $t_1 = 105$ °С, что примерно соответствует гидростатическому давлению столба воды высотой 2 м.

Энтропия парорастворной смеси S_d после адиабатного расширения равна энтропии перегретой жидкости S'_c в зоне закипания: $S_d = S'_c = 1,363$ кДж/(кг °С).

Количество образовавшегося вторичного пара определяется по зависимости [7]

$$x = \frac{S_d - S'_d}{S''_d - S'_d} = 0,00928 \text{ кг.}$$

Энтальпия парорастворной смеси после расширения

$$i_d = i'_d + r_d x,$$

где $r_d x$ — теплота, расходуемая на испарение; $i_d = 419,06 + 2257,2 \times 0,00928 = 440,007$ кДж/кг. Тепловой напор $h = i'_c - i_d = 440,17 - 440,007 = 0,163$ кДж/кг. Термический КПД цикла при адиабатном обратимом расширении

$$\eta_t = \frac{h}{i'_c - i'_a} = \frac{0,163}{440,17 - 419,06} = 0,0077.$$

При внутреннем относительном КПД $\eta_{o,e} = 0,25$ [5] действительный термический КПД $\eta_{tz} = \eta_{o,e}\eta_t = 0,193$ %. Работа вторичного пара при обратимом расширении $h = 163$ Дж/кг. Полезная работа вторичного пара в подъемном канале $h_z = \eta_{o,e}h = 40,75$ Дж/кг.

Скорость истечения парорастворной смеси в сепаратор при адиабатном обратимом расширении $v_d = \sqrt{2h + v_c^2} = 18,06$ м/с; в действительном цикле $v_z = \sqrt{2\eta_{o,e}h + v_c^2} = 9,02$ м/с.

Далее по найденной скорости уточняется структура потока и оценивается сопротивление подъемного канала. Повторно рассчитываются перегрев жидкости и полезная работа. Предположим, что значение работы сохранилось прежним, т. е. $h_z = 40,75$ Дж/кг. Работа гравитационного поля будет равна значению h_z в случае, если гидравлическое сопротивление опускного канала и подъемного до зоны закипания будет равно 4 м вод.ст.

Полученные результаты расчета сравним с данными гидродинамической модели. Принятая в нормативных расчетах физическая модель циркуляции потоков в парогенераторах сформулирована следующим образом: “движение рабочей среды в контуре с естественной циркуляцией происходит под действием гравитационных сил, возникающих вследствие различия плотностей среды в опускных — необогреваемых (или слабообогреваемых) и подъемных — обогреваемых трубах; созданный таким образом движущий напор в стационарных условиях равен сумме гидравлических сопротивлений всех участков контура и потерь на ускорение рабочей среды.” [8]. Следовательно, гидродинамический расчет сводится к составлению и проверке баланса удельной энергии неустановившегося потока, сжимаемого на подъемном участке канала.

По нормативному расчету можно найти скорость истечения жидкости в сепаратор под действием разницы давлений столбов среды в подъемном и опускном каналах. В предположении, что подъемный канал от места закипания жидкости до выхода потока в сепаратор заполнен паром, разница столбов будет $\Delta p = 2$ м. Тогда скорость истечения потока в сепараторе $v = \sqrt{2g\Delta p} = 6,26$ м/с. С учетом КПД подъемного канала $v = \sqrt{2g\eta_{o,e} \cdot \Delta p} = 3,13$ м/с.

Скорость истечения по нормативному методу не может быть выше найденной, так как согласно гидродинамике отсутствует энергия, обеспечивающая течение потока. В данном расчете использована разница уров-

ней среды, а в предыдущем — разница энтальпий пара. Отсюда по нормативному расчету получают более низкие скорости истечения, чем это следует из термодинамики, что приводит к различию в структурах потока. Именно в этом расхождении заключаются ошибки нормативных методов расчета парогенераторов и испарителей.

Название нормативных методов “гидравлический расчет аппаратов” неправомерно, так как законы механики жидкости (гидравлики) действуют в опускном канале и подъемном лишь до зоны закипания, а далее течение потока определяется в основном закономерностями газовой динамики.

Введение в расчет внутреннего КПД позволило выявить общую термодинамическую картину естественной циркуляции без сложных вычислений потерь энергии потоков на трение внутри канала. Вместе с тем значения внутреннего КПД установлены для ограниченного диапазона размеров труб и имеют весьма приближенный характер. В связи с этим необходимо рассмотреть более точные способы оценки сопротивлений каналов течению потоков.

1.2.3. Расчет контура во втором приближении

Расчет во втором приближении сводится к уточнению потерь энергии на трение потока в циркуляционном контуре.

Сопротивление гидравлической части контура течению жидкости оценивают по экспериментальным данным, приведенным, например, в справочнике [9].

Потери энергии на трение при течении двухфазных потоков в парожидкостной части контура рассчитывают по данным работ [10, 11].

При этом учитываются истинное объемное газосодержание ϕ и расходное объемное газосодержание β . В результате расчета определяют превышение сопротивления каналов течению двухфазных потоков по отношению к сопротивлению течения однофазных потоков.

При тангенциальном подводе потока в сепаратор 2 в нижней его части возникает вращающаяся воронка жидкости. Основная часть кинетической энергии двухфазного потока преобразуется за счет трения в вихре в тепло, а оставшаяся часть — в потенциальную энергию опускного потока. Оценке сопротивления входного участка опускного канала перемещению вихря посвящены обширные исследования, некоторые из которых будут использованы в разделе формирования материков.

В результате газодинамического расчета находят действительную скорость течения потока в циркуляционном контуре, после чего определяют поверхность теплообмена испарителя.

Аналогичный расчет необходимо выполнить при определении производительности скважин, снабжающих теплом геотермическую электростанцию.

1.2.4. Особенности циркуляционного контура как тепловой машины

Выделим ряд особенностей циркуляционного контура как устройства, преобразующего тепло в работу. Во-первых, в отличие от тепловых двигателей контур не может действовать без гравитационного поля. При адиабатном расширении в подъемном канале вторичный пар, поднимая жидкость, преодолевает воздействие гравитационного поля, чем делает запас его работы. Этот запас после конденсации (или отвода пара) используется для опускания жидкости. Поскольку масса поднимаемой и опускающейся жидкости одинакова, суммарная работа в контуре гравитационного поля равна нулю, однако термический КПД цикла оказывается зависимым от высоты контура, свойств жидкости и пара (относительный КПД также зависит от геотермических особенностей контура, свойств пара и жидкости, их соотношений по высоте подъемного канала). Циркуляция возникает самопроизвольно как результат стремления системы, находящейся в гравитационном поле, восстановить нарушенное равновесие.

Во-вторых, при равных уровнях жидкости в подъемном и опускном каналах U-образная форма контура обеспечивает минимальные затраты энергии на циркуляцию потоков. Как известно, эта форма обладает билатеральной (зеркальной) симметрией. На рис. 2 плоскость AA является плоскостью зеркальной симметрии.

В-третьих, контур, как правило, не производит внешнюю по отношению к установке работу, т.е. является закрытой системой. Получаемая из теплоты обогревающего пара механическая энергия расходуется внутри контура на циркуляцию потока, а затем вновь преобразуется в теплоту, воспринимаемую вторичным паром. Из располагаемого температурного напора на циркуляцию потоков затрачивается лишь незначительная его часть. Основная же часть расходуется на передачу тепла от дна озера к воде и от водяного пара к поверхности гор. В результате получаемой работы явно недостаточно для возврата системы в прежнее термическое состояние. Отсюда следует, что трение в каналах контура, с одной стороны, и потеря температурного напора на границах раздела фаз, с другой, переводят процесс естественной циркуляции потоков в разряд необратимых.

В свете полученных представлений рассмотрим циркуляцию потоков на ближайших планетах, например, на Юпитере.

1.3. ЕСТЕСТВЕННАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ПОТОКОВ НА ЮПИТЕРЕ

Юпитер — самая крупная из планет-гигантов. Масса Юпитера больше массы Земли в 318 раз. Ускорение силы притяжения на Юпитере в 2,6 раза выше, чем на Земле. На поверхности Юпитера плещется океан жидкого водорода.

Количество тепла, приходящего от Солнца на единицу площади, в 27 раз меньше, чем на единицу площади Земли. Такое количество тепла способно нагреть океан до температуры (равновесной) 110 К. Между тем прямые измерения как наземными средствами, так и с помощью космических зондов указывают на температуры 129 К. Близ экватора обнаружены более высокие температуры. Такая температура может быть обусловлена только потоком тепла из недр планеты, превышающим поток, приходящий от Солнца, в 2 раза [12, 13].

При температуре 129 К водород в атмосфере находится в газообразном состоянии. Но по мере погружения вглубь планеты водород переходит вначале в жидкое состояние, а затем — в металлическое.

Поскольку основное тепло поступает от ядра, то вблизи границы с атмосферой жидкий водород должен вскипать. Это позволяет использовать методику, разработанную для геотермального озера, при расчете естественной циркуляции потоков на Юпитере.

Можно утверждать, что при прочих равных условиях естественная циркуляция в сосуде с жидким водородом на Земле будет менее интенсивной, чем в природных условиях на Юпитере. В последнем случае термический КПД контура будет значительно выше.

Необходимые для расчета приближенные данные о свойствах жидкого и газообразного водорода при температуре на границе раздела фаз можно получить, экстраполируя значения величин, приведенных в справочной литературе [14–17].

ВЫВОДЫ

Подытожим результаты исследований. Итак, состояние воды в геотермальном озере неустойчиво по отношению к силам, возникающим в системе при поступлении тепла из земных недр в придонные слои. Циркуляция воды возникает самопроизвольно как результат стремления системы, находящейся в гравитационном поле, восстановить нарушенное равновесие.

Коэффициент полезного действия циркуляционных контуров с высотой канала вскипания $H = 2-3$ м находится в пределах $\eta = 0,1-0,2$ %. КПД возрастает с увеличением высоты контура, давления в системе и интенсивности гравитационного поля.

Поскольку гравитационная неустойчивость возникает внезапно при достижении системой определенного сочетания параметров, то рассматриваемый эффект следует отнести к категории спонтанных.

Условимся в дальнейшем называть то или иное природное явление по виду сил, обеспечивающих подачу потока в зону нагрева. В данном случае поступление холодной воды ко дну озера происходит под воздействием сил тяготения. Поэтому естественную циркуляцию потоков назовем гравитационным эффектом.

ТЕРМОДИНАМИКА ОКЕАНА

Суть данного раздела исследований сводится к доказательству положения о том, что находящаяся вблизи звезды планета, имеющая атмосферу и океан, неустойчива по отношению к силам, вызывающим ее вращение вокруг своей оси.

До сих пор представления по данному вопросу укладывались в аксиому: “Вращение вокруг оси — общее свойство свободных тел, одна из форм их движения. Оно возникает за счет того, что скорости частиц, из которых образовалось тело, обязательно имеют составляющую, перпендикулярную радиусу. Сложение этих составляющих по закону сложения векторов определяет направление и угловую скорость вращения тела” [18].

Данное утверждение касается лишь начального момента образования планеты и мало чем проясняет ее сегодняшнее состояние.

Нам же предстоит установить, что при определенных условиях планета, воспринимающая солнечные лучи, должна самопроизвольно вращаться. Причем величина угловой скорости устанавливается в зависимости от интенсивности солнечного излучения, размеров и массы планеты, а также свойств ее газожидкостной оболочки.

2.1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ ПОТОКОВ В ОКЕАНЕ

Принято считать, что природные явления на Земле носят естественный характер. Под этим подразумевается наиболее распространенный и безупречно действующий процесс естественной циркуляции потоков, суть которого рассмотрена в предыдущем разделе.

Но наблюдаемые атмосферные процессы довольно хаотичны и в значительной степени отклоняются от законов естественной циркуляции.

В еще меньшей мере укладывается в существующие представления динамика вод Мирового океана. Обогрев Земли Солнцем приводит к тому, что теплые воды располагаются над холодными, что само по себе исключает

ет возможность возникновения естественной циркуляции. Между тем, мощные течения пересекают океан в различных направлениях, а на их границах с неподвижными слоями непрерывно возникают и исчезают водные вихри. Вихри образуются также под воздействием ветра (циркуляционные ячейки Ленгмюра). Наиболее значительное морское течение существует вблизи берегов Антарктиды (циркумпольное течение) [19–21].

Разумеется, для генерирования вихрей и поддержания определенной скорости течения потоков необходима энергия. Логично предположить, что динамические процессы в океане вызываются и поддерживаются как за счет энергии воздушных потоков, так и частичного использования энергии вращения Земли. Очевидно также следствие такого подхода: постоянное поглощение энергии Земли на образование и поддержание водных структур неизбежно приведет к снижению скорости ее вращения. Поскольку этого не происходит, то должен быть механизм непрерывной подпитки энергии вращения Земли энергией Солнца, но отличный от механизма естественной циркуляции потоков. Эту частную задачу по выяснению механизма циркуляции будем решать поэтапно.

2.1.1. Гидродинамическая модель циркуляции

Вначале примем за основу приближенную гидродинамическую модель циркуляции, относящуюся к несжимаемым жидкостям, и покажем ее положительные и отрицательные стороны.

Предположим, в некий сосуд с вертикальной герметичной перегородкой налиты: в один отсек — теплая вода, а в другой — холодная. Осторожно извлечем перегородку. При начавшемся смещении теплая вода будет стремиться занять верхнее положение в отсеке холодной воды, а холодная — растекаться по всему дну сосуда.

Именно эта причина, как утверждают океанологи, заставляет двигаться теплую воду к полюсам, а холодную — к экватору [22].

Попытаемся в первом приближении ориентироваться на эту так называемую “термохалинную” циркуляцию.

Глядя на Землю сверху, можно увидеть, что у восточных побережий материков расположены мелкие моря. Эти моря выполняют роль аккумуляторов тепла. Отсюда начинают свой путь наиболее мощные теплые течения. Двигаясь в северо-восточном и юго-восточном направлениях, эти потоки как бы увлекают за собой Землю, что и определяет направление ее вращения. Получив от теплых потоков импульс силы, Земля передает его холодным потокам. В принципе данной ситуации соответствует на диаграмме $p-V$ (рис. 5) равенство площадей $bcab$ и $a21ba$ (без учета трения в

потоках). Но в качестве сил, проталкивающих холодные потоки в зону нагрева к экватору, выступают теперь силы центробежного поля Земли.

Не нужно забывать, что в природных условиях слои воды находятся на шаровой вращающейся поверхности. Оба вида потоков участвуют в общем с Землей вращении. Так, теплый поток на экваторе обладает линейной скоростью 464 м/с. По мере продвижения к полюсу его расстояние от оси вращения Земли уменьшается, и в силу сохранения количества движения скорость вращения должна увеличиться. Когда этот поток достигает широты 45° , его расстояние от оси вращения Земли составит 0,707 своего первоначального значения на экваторе, и вследствие этого его скорость вращения около земной оси должна увеличиться до 656 м/с. Между тем, скорость вращения земной поверхности на широте 45° меньше и составляет всего 328 м/с. В этой ситуации в теплом потоке должна была бы возникнуть неустойчивость. Но поскольку теплый поток через слои воды передает свое теряемое количество движения холодному потоку, то значительных возмущений потоков не происходит. Тем не менее, наблюдаемая форма передачи импульса силы через образование вихрей ведет к большим потерям энергии на трение в закрученных потоках воды.

Гидродинамическая модель позволила установить, что Земля принимает участие в циркуляции воды в океане, воспринимая определенное количество движения от теплых потоков и передавая его холодным потокам.

И все же приближенная модель не в состоянии объяснить причин погружения теплых потоков в холодные слои при подходе к полярным зонам.

Кроме того, получаемой за счет разницы плотностей теплой и холодной воды кинетической энергии явно недостаточно для прокачивания потоков с определенной скоростью на тысячи километров через слои неподвижной воды и для преодоления трения в образующихся вихрях.

Ситуация меняется, если расчеты проводить на базе газодинамической модели.

2.1.2. Газодинамическая модель циркуляции

Априори можно утверждать, что основной момент количества движения Земли возникает в нижних и средних широтах, воспринимающих основной поток солнечной радиации. В самом деле, если колоссальная масса воды непрерывно испаряется, поступая в атмосферу в виде высокоскоростных паровоздушных потоков, то океан должен испытывать ответную реакцию, воспринимаемую затем Землей.

Проследим путь преобразования энергии. С этой целью рассмотрим несколько схем, поясняющих наблюдаемые процессы.

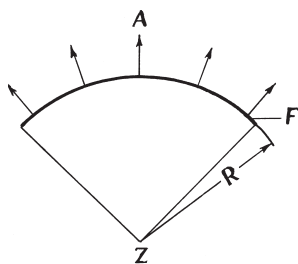
Рассечем Землю по экватору и посмотрим на один из секторов этого сечения со стороны, например, Северного полюса (рис. 6). В случае неподвижной Земли потоки пара радиально поднимаются от ее поверхности, захватывая с собой и нагревая воздух.

Каждый паровой поток (стрелка А) сообщает Земле свое количество движения. Реактивные силы направлены по радиусу к центру Земли. Поскольку паровые потоки расположены равномерно по шаровой поверхности, то возникающие импульсы силы компенсируют действие друг друга.

Ситуация изменяется при вращении Земли. В этом случае незначительное запаздывание скорости вращения атмосферы относительно скорости вращения Земли приводит к искривлению направления движения парового потока А'. Этому же направлению соответствуют импульсы сил, равные количеству движения, приобретенному потоками за счет тепловой энергии океана (рис. 7). Вектор А является реакцией этой силы. Разложим вектор А на составляющие В и С. Воздействие вектора С и заставляет Землю вращаться.

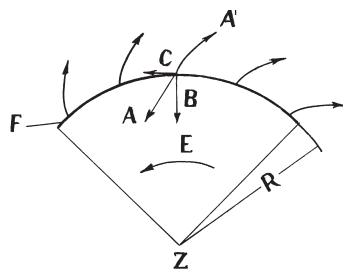
На данном этапе исследования ограничимся рассмотрением процессов в пограничных слоях.

На самой границе океан—атмосфера расположены ламинарные слои с аномальной температурой. Здесь нас интересует слой воды толщиной примерно $5 \cdot 10^{-2}$ м, где происходит снижение температуры по направлению к границе раздела фаз на величину $1-3$ °С. Это снижение вызвано потерей тепла поверхностным слоем в результате излучения в атмосферу, испарения и контактного теплообмена с воздухом. Но основная часть тепла уходит в атмосферу путем испарения воды.



Z — центр Земли; *R* — радиус; *F* — сечение поверхности Земли; *A* — направление движения влажных потоков воздуха.

Рис. 6. Сектор экваториального сечения неподвижной Земли



E — направление вращения Земли; *A'* — направление движения влажных потоков воздуха; *A* — вектор силы реакции влажного потока воздуха; *B*, *C* — составляющие силы реакции.

Рис. 7. Сектор экваториального сечения вращающейся Земли

Ниже тонкого слоя расположен так называемый термоклин с более высокой температурой воды [23, 24].

В создании крутящего момента Земли участвует также и тонкий ламинарный слой атмосферы, прилегающий непосредственно к поверхности океана. Зададимся лишь такой толщиной атмосферного слоя, где падение температуры вверх от границы раздела фаз происходит на ту же величину, что и в поверхностном слое воды, т. е. $1-3^{\circ}\text{C}$. Указанное допущение вытекает из того факта, что границу раздела фаз нельзя считать строго фиксированной. Даже в спокойную погоду вершины гребней зыби на поверхности океана и мелкие брызги преодолевают высоту, соответствующую выбранной толщине атмосферного пограничного слоя.

Таким образом, суммарный температурный напор, обеспечивающий испарение воды с поверхности океана, составляет $2-6^{\circ}\text{C}$.

Теперь для оценки количества движения, получаемого Землей на границе раздела атмосфера—океан, мы имеем полное право воспользоваться уже известным нам треугольным циклом. Для этого рассмотрим систему, состоящую из теплого течения, например Гольфстрима, и обратного холодного потока, движущегося в глубине океана. По мере движения теплого потока к северу часть воды испаряется, образовавшиеся пары поднимаются вверх, причем резкое падение их температуры на единицу высоты наблюдается в тонких слоях, прилегающих к поверхности океана. В верхних

слоях атмосферы пары конденсируются и в виде дождя вновь выпадают на поверхность Земли.

Данная последовательность явлений графически выглядит на диаграмме $T-S$ как ступенчатый треугольный цикл (рис. 8). Испарение воды с поверхностного слоя океана соответствует адиабатным процессам c_1d_1 , c_2d_2 , c_3d_3 и т. д. Условно примем, что отвод пара из тонкого ламинарного пограничного слоя атмосферы эквивалентен его конденсации. После конденсации водяного пара и перемещения основной массы остывающей воды по течению (процессы d_1a_1 , d_2a_2 , d_3a_3 и т. д.) следует нагнетание воды в зону нагрева

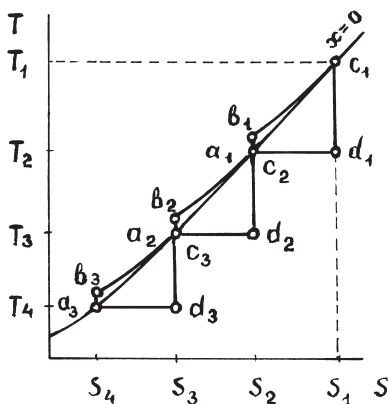


Рис. 8. Ступенчатый цикл циркуляционного контура Земли в системе координат $T-S$

(процессы a_1b_1 , a_2b_2 , a_3b_3 и т. д.). Наконец, линии b_1c_1 , b_2c_2 , b_3c_3 и т. д. относятся к процессу нагрева воды за счет солнечного излучения.

Суммарная площадь треугольных циклов отдельных участков потока соответствует количеству тепла, преобразуемого в работу, расходуемую на ускорение вращения Земли.

Сумма длин вертикальных участков a_1b_1 , a_2b_2 , a_3b_3 и т. д. находится в корреляции с работой Земли, затрачиваемой на перекачивание холодного потока к экватору. Сюда же следует отнести работу Земли по преодолению своего торможения в результате выпадения ранее испарившейся влаги в виде дождя. Количество энергии, полученное Землей на одном из участков теплого потока, в тот же момент передается ею участку холодного потока, протекающему в нижележащих слоях воды. По сути дела, Земля действует как своеобразный многоступенчатый турбонасос, непрерывно вырабатывающий и сразу же поглощающий механическую энергию. Причем диаметр ступеней турбины уменьшается от экватора к полюсам, а насоса, наоборот, — увеличивается.

Тем самым Земле удастся перебросить избыток тепла с экватора к полюсам.

Реакция С, обеспечивающая вращение Земли (рис. 7), проявляет себя лишь до зон погружения теплых вод в глубь океана. Само же по себе погружение теплой воды вызвано всасывающим действием подводных частей материков, вращающихся вместе с Землей. Так, например, шельфы полуостровов Антарктиды действуют как лопатки центробежного насоса, всасывающего воду (в том числе и поступающую с поверхности) и нагнетающие ее в обратном направлении к экватору. При этом основная часть глубинной воды поднимается по склонам шельфа к поверхности. Сохраняя свой момент количества движения, вытолкнутые на поверхность потоки воды частично поддерживают циркумпольное течение, создаваемое вокруг Антарктиды западными ветрами.

Примерно так же действует дно Северного ледовитого океана. Представим себе чашу, наполовину заполненную водой. Причем ее сечение слегка увеличивается с высотой. Примемся быстро вращать чашу вокруг своей оси. Вода также начнет вращаться, постепенно поднимаясь по конической стенке и переливаясь через ее край. Именно так действует дно океана, всасывая потоки воды в своей центральной части и нагнетая их к экватору своей периферийной более высокой частью.

Из анализа треугольного цикла мы знаем, что теплый поток обладает достаточным количеством движения для того чтобы, восполняя массу убывающей холодной воды, войти с поверхности внутрь центральной вращаю-

шейся части дна океана. Представленный механизм действия выступающих к экватору частей шельфа Антарктиды и дна Северного ледовитого океана вполне реален, если допустить, что в приполярных районах вращение Мирового океана вокруг оси Земли несколько запаздывает по отношению к вращению самой планеты.

Обратимся к свойствам Земли как реактивной турбины. Из теории известно, что максимальный КПД таких турбин достигают при разбиении располагаемого температурного напора на несколько частей. В этом случае удастся снизить скорость течения пара в каждой ступени и тем самым добиться минимальных потерь на трение потоков о стенки каналов [25, 26].

Земля успешно справляется с этой задачей, реализуя многоступенчатый треугольный цикл.

Достижимый КПД сопла малого диаметра $(3-5) \times 10^{-3}$ м реактивной турбины, работающей на вскипающей жидкости, находится в пределах 64 % [27]. Можно представить себе сотовое расположение циркуляционных ячеек над поверхностью теплых течений. Тогда подъемные каналы этих ячеек действуют как сопла реактивной турбины.

Последнее обстоятельство открывает возможность приближенной экспериментальной оценки внутреннего КПД циркуляционных ячеек, действующих на границе океан—атмосфера при температурных напорах 2–6 °С.

Отметим, что суммарное действие ячеек заключается в сообщении Земле определенного количества движения, преобразуемого ею в момент количества движения. Отсюда экспериментальная модель должна выглядеть как массивный вертикальный вал, имитирующий тело Земли, с установленными на нем реактивной турбиной (аналог, например, экваториальной зоны Земли) и циркуляционным насосом (аналог шельфа Антарктиды). С учетом шаровой формы Земли диаметр турбины должен быть значительно больше диаметра насоса.

Впрочем, данная модель может рассматриваться и как отдельная ступень макросистемы: теплое течение—Земля—холодное течение.

Установку необходимо также снабдить теплообменником для подогрева циркулируемой воды и конденсатором для конденсации пара, образующегося при вскипании воды в соплах турбины.

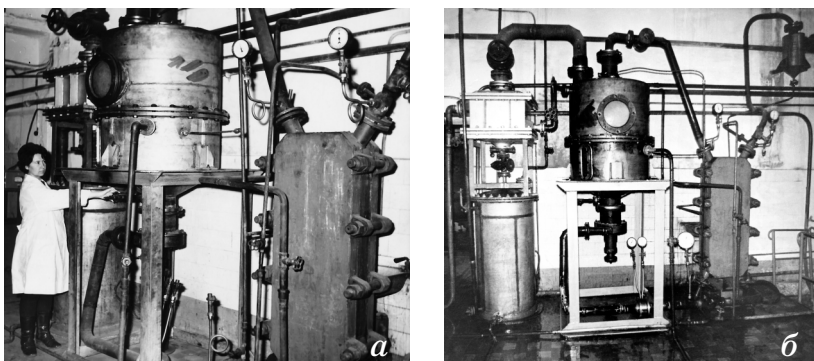
Предстоит показать, что при температурных перегревах циркулируемого потока в пределах 2–6 °С вал турбонасоса самопроизвольно начнет вращаться. При этом вырабатываемой турбиной энергии будет достаточно для работы циркуляционного насоса, забирающего холодную воду после турбины и конденсатора и нагнетающего ее через теплообменник в ту же

турбину. Такая циркуляция соответствует наблюдаемой циркуляции воды в океане.

Кроме доказательства термодинамической природы вращения Земли, сопровождаемого циркуляцией потоков, модель должна позволить оценить КПД циркуляционных контуров, действующих при столь низких температурных напорах.

Выдвинутым требованиям к экспериментальной модели Земли в основном удовлетворяет компактная испарительная установка с турбинным приводом циркуляционного насоса [28].

Рассмотрим результаты испытаний этой установки. Внешний вид ее дан на фото (рис. 9), а схема установки представлена на рис. 10.



*Рис. 9. Внешний вид испарительной установки:
а — в процессе монтажа; б — в рабочем состоянии*

2.2. ИСПАРИТЕЛЬ С ТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА

При работе испарительной установки (рис. 10) перегретый раствор из нагревательной камеры 6 через соединительный трубопровод и полый вал 3 поступает в горизонтальные каналы сегнероваго колеса, а затем — в расположенные по периферии каналов сопла Лаваля 4.

При выходе в сепаратор 2 раствор вскипает, вторичный пар, расширяясь, сообщает ускорение парорастворной смеси. Возникающая в соплах Лаваля реактивная сила приводит во вращение вертикальный вал, обеспечивая работу циркуляционного насоса 5.

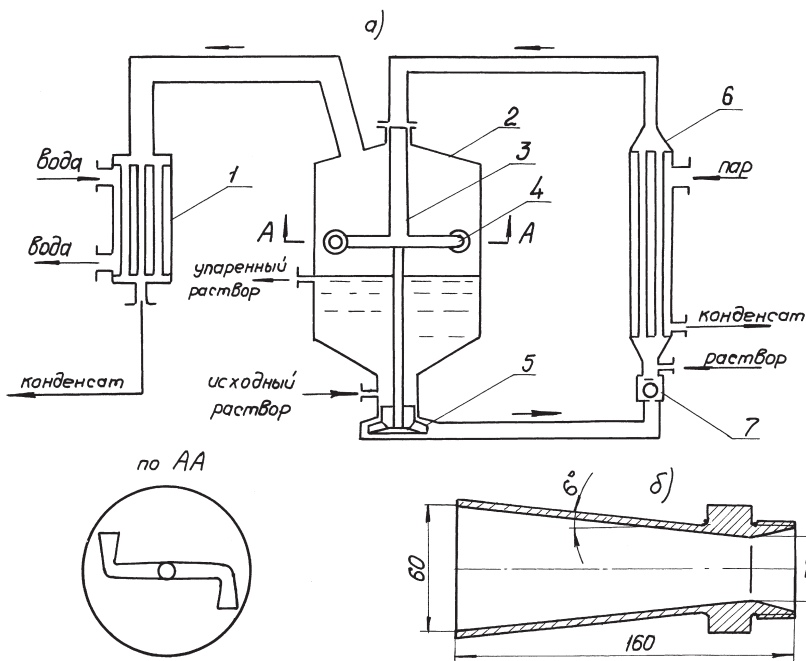


Рис. 10. Схемы испарительной установки (а) и сопла Лавалья (б)

Из нижней части сепаратора насос через соединительный трубопровод и пусковой обратный клапан 7 непрерывно нагнетает раствор в нагревательную камеру 6; одновременно вторичный пар удаляется в конденсатор 1.

Конструктивные параметры изменялись в следующих пределах: диаметр турбины — 260, 360, 400, 560 мм; диаметр критического сечения сопла Лавалья — 14, 20, 25, 30, 35 мм; число сопел — 2 шт.; диаметр лопастного колеса насоса — 168 и 260 мм; ширина выходного участка лопасти колеса насоса — 12, 15, 23 мм; диаметр сепаратора — 600 и 800 мм; нагревательная камера из гофрированных пластин типа ПР-0,5Е с 10 каналами общим поперечным сечением $F_k = 0,018 \text{ м}^2$, теплопередающая поверхность камеры — 10 м^2 .

При конструировании реактивной турбины учтены результаты работ [29–31]. Насос, созданный на основе опытных данных [32], обеспечивал оптимальную скорость течения раствора в пластинчатой камере в пределах 0,3–0,5 м/с [33]. В каждом режиме установка работала до 8 ч, пара-

Таблица 1

Номер опыта	Температура потока, °С		Расход жидкости, кг/с		Сопротивление, м вод. ст.		Число оборотов вала, об/мин	Мощность турбины, кВт	Степень сухости пара, кг/кг		Скорость потока, м/с	
	перед турбиной	после турбины	циркулируемой	испарившейся $M_t \times 10$	контура и турбины	турбины			перед соплом $x \times 10^4$	после сопла $x \times 10^2$	в узкой части сопла	относительная на выходе из сопла
1	104,2	100	8,25	1,25	4,9	1,7	500	0,660	7,31	1,495	6,15	29,6
2	106,5	100	8,50	1,53	6,5	3,0	680	0,905	7,14	1,725	5,80	33,4
3	109,0	100	9,10	2,11	7,7	3,9	790	1,142	6,40	2,280	5,75	41,4
4	111,0	100	9,42	2,50	10,1	6,1	940	1,555	6,06	2,600	4,73	52,1
5	115,0	100	9,70	3,28	13,2	8,8	1000	2,090	7,10	3,310	5,06	64,3
6	120,0	100	10,15	4,44	17,0	12,4	1100	2,820	8,40	4,230	5,38	72,1

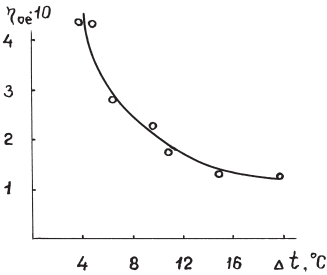


Рис. 12. Зависимость относительного эффективного КПД турбины от температурного напора в турбине

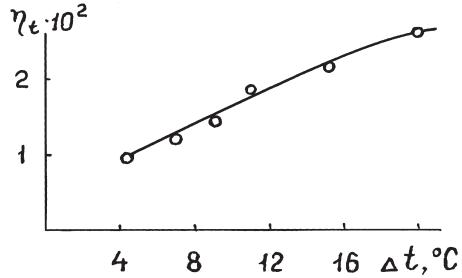


Рис. 13. Зависимость термического КПД циркуляционного контура от температурного напора в турбине

Попытка дальнейшего уменьшения диаметра турбины по отношению к диаметру рабочего колеса насоса приводит к пульсации потока и прекращению циркуляции. Изменение ширины лопатки колеса насоса не влияет на скорость циркуляции потока.

Увеличение до определенного предела суммарной площади F критических сечений сопел Лавала приводит к возрастанию интенсивности теплопередачи. Для установившейся циркуляции площадь F должна быть примерно в 10 раз меньше общего поперечного сечения F_k каналов нагревательной камеры.

С учетом этого обстоятельства влияние тепловой нагрузки на интенсивность теплопередачи изучалось при $F = 14, 12 \times 10^{-4} \text{ м}^2$. Из табл. 1 видно, что изменение температурного напора в нагревательной камере влияет на интенсивность теплопередачи, о чем свидетельствует начало закипания жидкости в камере. Ниже приведена последовательность расчета КПД по опытным данным.

Паросодержащие смеси x_f при обычном дросселировании потока в сепаратор определяют по выражению $x_f = M_t/G$. Энтальпия смеси для этого случая $i_f = i'_a + r_f x_f$.

При изоэнтальпийном процессе дросселирования $i = \text{const}$, поэтому $i_1 = i_f [7]$.

Паросодержание смеси перед турбиной $x_1 = \frac{i_1 - i'_b}{r_1}$. Энтропия потока

перед турбиной $S_1 = S_b + \frac{r_1 x_1}{T_1}$.

При адиабатном процессе расширения выполняется равенство $S_1 = S_2$. После адиабатного расширения паросодержание смеси

$$x_2 = \frac{S_2 - S_2'}{S_2'' - S_2'}$$

Энтальпия парожидкостной смеси после адиабатного расширения

$$i_2 = i_a' + r_2 x_2.$$

Термический КПД цикла 2ab1 при обратимом адиабатном расширении пара составит: $\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_a'}$. Измерение характеристик насоса упрощает расчет относительного эффективного КПД турбины.

Мощность, потребляемая насосом, рассчитывается по формуле

$$N_H = \frac{G \Delta p}{102 \eta_H},$$

где Δp — м вод. ст., η_H — КПД насоса; мощность турбины — по формуле

$$N_T = \eta_{o.e} \frac{G(i_1 - i_2)}{1000}.$$

Из равенства выражений для N_H и N_T определяется относительный эффективный КПД турбины $\eta_{o.e}$. Расчетные значения $\eta_{o.e}$ и η_t в зависимости от температурного напора в турбине показаны на рис. 12, 13.

Сопротивление подводящего трубопровода течению парожидкостного потока обуславливает падение температурного напора примерно на 3 °С. В результате рассчитанные по опытным данным значения термических КПД оказываются ниже ожидаемых.

Значительные потери в турбине вызваны ударом парожидкостной струи, выходящей из одного сопла, о корпус другого и, вероятно, явлением метастабильности [27]. Последнее подтверждается слабым диспергированием жидкости на выходе из сопел Лавала. Оба отрицательных фактора усиливаются с повышением температурного напора и, следовательно, числа оборотов.

Без учета механических потерь значение термического КПД реального цикла находится по зависимости $\eta_{tz} = \eta_{o.e} \eta_t$. Поскольку с увеличением Δt значения η_t возрастают, а $\eta_{o.e}$ уменьшаются, термический КПД η_{tz} реального цикла слабо зависит от температурного напора в турбине. В среднем для принятого конструктивного сочетания камеры, турбины и насоса КПД цикла $\eta_{tz} = 0,25$ %. Это обстоятельство позволяет обеспечить нормальную работу контура при перегреве раствора в пределах 3–4 °С, что и требуется для доказательства самопроизвольного вращения модели Земли при крайне низких температурных напорах циркулируемой рабочей среды.

Анализ конструкции контура и турбины указывает на возможность осуществления ряда мероприятий по сокращению потерь на трение, т. е. по увеличению значений $\eta_{0.e}$.

При конструировании и испытании аппарата решены следующие проблемы: компенсация температурных удлинений вала и осевой силы, возникающей при работе насоса; исключение вихреобразования в слое жидкости над насосом; охлаждение сальников и подшипников; пуск установки. При отсутствии обратного клапана 7 (см. рис. 10) подача греющего пара в нагревательную камеру вызывает интенсивное вскипание раствора. Появляющийся вторичный пар частично через верхний, а частично — через нижний трубопровод вытесняет жидкость в сепаратор, что приводит к затуханию процесса теплопередачи. Для организации устойчивой циркуляции необходимо обеспечить вскипание раствора в критических сечениях сопл Лавалья.

Размещение в контуре обратного клапана 7 и подача исходного раствора с повышенным расходом непосредственно в нагревательную камеру позволяют разогнать турбину до требуемых оборотов. По достижении циркуляционным насосом давления, превышающего давление в камере, обратный клапан открывается и поток устремляется через камеру в турбину. С установлением циркуляции питание установки раствором непосредственно в нагревательную камеру прекращается.

Как видим, сам факт создания данного аппарата подтверждает несовершенство гидродинамической модели циркуляции потоков. Так, с позиции гидродинамики размещение турбины на выходе из подъемного канала циркуляционного контура дает лишь дополнительное сопротивление. Тем не менее, аппарат действует безукоризненно, что позволяет использовать газодинамическую модель при изучении природных процессов.

Обратимся к правомерности использования данной установки в качестве модели Земли.

Прежде всего, введение в модель природной среды воздуха переводит процесс вскипания воды в процесс поверхностного испарения.

Далее, в океанологии принято относить тонкие пограничные слои к ламинарным системам, где обмен теплом и веществом происходит теплопроводностью и диффузией. Однако такой подход не является достаточно корректным. Установлено, что ничтожное варьирование температуры как по вертикали, так и по горизонтали, сопровождающееся изменением поверхностного натяжения воды, приводит к возникновению циркуляционных ячеек (неустойчивости Марангони). Эти ячейки обеспечивают интенсивное перемешивание воды в пограничном слое [34]. Известно также, что незначительные перепады температуры между слоями воздуха вызывают естественную конвекцию потоков [35].

Это движение усиливается при поступлении в циркулируемый поток водяного пара.

При атмосферном давлении объем единицы массы воды, превращаясь в пар, увеличивается в 1600 раз. В этих условиях часть тепловой энергии неизбежно переходит в кинетическую энергию потоков. Именно на границе раздела океан – атмосфера хаотичное тепловое движение молекул в поверхностном слое воды приобретает стройность и организованность в поднимающихся вверх паровоздушных потоках.

Наблюдаемая на поверхности морей зыбь, по-видимому, является результатом воздействия реактивных сил, возникающих в подъемных каналах мелкомасштабных циркуляционных ячеек.

Для рассматриваемого случая проблема, по существу, сводится к сравнительной оценке КПД подъемного канала одной из ячеек с КПД сопла испытанного контура.

Исходные данные для расчета КПД мелкомасштабной ячейки

Температурный перепад, Δt , °С.....5

Температура нижней границы тонкого слоя воды, T_1 , К(°С).....301 (28)

Температура верхней границы тонкого слоя атмосферы, T_2 , К(°С) ...296 (23)

Показатели гидропаровой турбины при температурном перепаде Δt , °С5

$\eta_t = 1,0 \%$; $\eta_{o.e} = 38 \%$; $\eta_{tz} = 0,38 \%$.

Расчет

Определяем термический КПД циркуляционной ячейки

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{5}{301} = 0,0166.$$

$$\eta_t = 1,66 \%$$

Оцениваем величину внутреннего КПД $\eta_{o.e}$.

Поскольку в подъемном канале ячейки однофазная среда, то потери на трение будут значительно ниже, чем у сопла турбины. Но мы рассматриваем подъемный канал ячейки как сопло реактивной турбины. В лучшем случае 50 % получаемой механической энергии уйдет со струей, а 50 % — с вращающейся массой Земли. Таким образом, в оптимальном варианте $\eta_{o.e} = 50 \%$. В худшем варианте этот КПД не может быть ниже КПД гидропаровой турбины, т. е. $\eta_{o.e} = 38 \%$.

Отсюда общий КПД будет

$$\eta_{tz(1)} = 0,0155 \times 0,5,$$

$$\eta_{tz(2)} = 0,0166 \times 0,38,$$

$$\text{или } 0,63 \% < \eta_{tz} < 0,83 \%$$

Таким образом, океан и атмосфера в своих тонких пограничных слоях затрачивают на вращение Земли лишь 0,6–0,8 % располагаемой тепловой энергии.

Безусловно, испытанная модель испарителя лишь приближенно соответствует модели Земли. Об этом свидетельствует предыдущий расчет. Но главное отличие этих двух объектов состоит в том, что масса океана составляет всего 0,02 % от массы Земли, в то время как масса воды в циркуляционном контуре испарителя даже несколько превышает массу турбопонасоса. Но отмеченное различие в соотношении масс сказывается лишь на инерционных свойствах сравниваемых объектов. Так, если для повышения числа оборотов турбопонасоса с 500 до 1100 в минуту необходимы всего одна-две минуты, то океану для ускорения вращения Земли на несколько оборотов в год понадобится несколько миллионов лет.

Таким образом, испытания компактного испарителя позволяют утверждать, что циркуляция вод в мировом океане происходит с участием центробежного поля Земли. Это участие носит естественный характер и возникает лишь при определенном сочетании параметров системы, согласованном с предварительной закруткой Земли.

Из этих же опытов следует, что при малых температурных напорах КПД преобразования тепловой энергии океана в кинетическую энергию потоков не превышает одного процента.

Отметим, что циркуляционное устройство — турбопонасос обладает билатеральной и поворотной симметрией. Эти же свойства присущи циркуляционному контуру Земли.

Для выяснения эффективности циркуляционного контура Земли как тепловой машины рассмотрим гидродинамику потоков на Юпитере.

2.3. ОСОБЕННОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЮПИТЕРА

Необходимым условием вращения планеты является наличие в ее внешней оболочке вещества (рабочего тела), способного изменять свой объем при испарении и конденсации. На Земле таковым веществом является вода, а на Юпитере — водород. Источниками тепла служат Солнце и недра планет, холодильником — окружающее космическое пространство.

Вывос тепла из экваториальной зоны планет к полюсам обеспечивается системой, состоящей из трех макроэлементов, обменивающихся между собой определенным количеством движения: теплого течения, тела планеты и холодного течения.

Если теплые течения заметить под толстым слоем облаков сложно, то выход из глубины холодных течений вблизи экватора фиксируется по образующимся в атмосфере пятнам. Объясняется это тем, что над выходом по-

тока переохлажденного жидкого водорода на поверхность океана газообразный водород, из которого состоит атмосфера, конденсирует. То обстоятельство, что наиболее крупное пятно (так называемое “Красное пятно”) находится в южном полушарии, а в северном — лишь несколько мелких пятен, объясняется полюсной асимметрией стока тепла.

Южный полюс Юпитера, так же, как и южный полюс Земли, отправляет в космос больше энергии, чем северный, что и обуславливает более мощную циркуляцию потоков в южном полушарии.

Оригинален принцип распределения потоков на Юпитере. Как лучистая энергия Солнца, так и глубинное тепло самой планеты сравнительно равномерно поступают в экваториальную зону. В то же время холодные потоки выходят к экватору в отдельных ограниченных районах. Для нагрева переохлажденного водорода необходимо, чтобы его потоки равномерно распределялись по поверхности планеты. Данная задача решается на Юпитере более успешно, чем на Земле, где холодные потоки воды, например, в северном полушарии, отделены друг от друга материками.

Холодные потоки жидкого водорода (жгуты), увлекаемые планетой, как бы перекачиваются по более плотным нижележащим слоям. Такой режим течения приводит к вращению “жгутов” вокруг своей оси в сторону, противоположную вращению самой планеты. Одновременно “жгуты” запаздывают в своем движении вокруг оси планеты от вращения самой планеты. Именно это обстоятельство и приводит к рассеиванию переохлажденного полярного водорода среди слоев сравнительно теплого экваториального водорода.

Через некоторый период времени после того, как Юпитер слегка разворачивается к Солнцу своим южным полюсом, силуэт Красного пятна должен ослабевать, поскольку меняется баланс притока и стока тепла в этой части планеты. Получаемое холодным потоком в глубинах Юпитера тепло оказывается недостаточным для выделения из переохлажденного жидкого водорода растворенных газов, имеющих красноватый оттенок. Значительные потоки тепла из глубин, низкая плотность водорода и более мощная гравитация обеспечивают Юпитеру более высокие (по сравнению с Землей) скорости вращения. Очевидность этого факта можно проследить по треугольному циклу, учитывая, что вскипание водорода происходит с глубины в несколько сотен метров.

Замечание

Не будет большой ошибкой, если вращение небесных тел, обладающих газоплазменной или газожидкостной оболочкой, объяснять теми же термодинамическими причинами.

В таком случае наблюдаемые на Солнце пятна являются результатом выхода вблизи экватора более холодных потоков плазмы, поступающих с полюсов.

ВЫВОДЫ

Подведем итог изложенному в данном разделе исследованию. Земля, воспринимая лучистую энергию Солнца, неустойчива по отношению к силам, вызывающим ее вращение вокруг своей оси. Эти силы возникают самопроизвольно как результат перераспределения тепла в атмосфере и океане. Обязательным условием проявления сил является наличие трех макроэлементов, обменивающихся между собой определенным количеством движения: теплого испаряющего потока воды,двигающегося с экватора к полюсу, собственного тела Земли и холодного потока, перемещающегося с полюса к экватору.

Для расчета потоки разбиваются на отдельные ступени. Коэффициент полезного действия одной из таких ступеней, рассчитанный на температурный градиент в тонких пограничных слоях атмосферы и океана, не превышает одного процента.

Очевидно также, что данный процесс имеет естественную природу. Но в отличие от предыдущего случая естественной циркуляции, где подвод основной массы холодной воды в зону нагрева обеспечивается гравитационным полем, здесь определяющим является центробежное поле Земли. Это позволяет назвать данный вид циркуляции ротационным эффектом.

Поскольку ротационная неустойчивость возникает при достижении системой определенного сочетания параметров и после предварительной закрутки Земли, то рассматриваемый эффект также можно отнести к категории спонтанных.

Сравнительные термодинамические расчеты показывают, что высокая скорость вращения Юпитера связана со значительным гравитационным полем, низкой плотностью газообразного и жидкого водорода и подводом основной части тепла из глубин планеты.

ТЕРМОДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ

Исследуем устойчивость планеты к вековым изменениям климата. Кроме того, проследим тенденцию климатических изменений в последние тысячелетия.

Как уже упоминалось, поверхностные слои океана разогреты на экваторе до 27–29 °С. Конденсация паров воды в атмосфере происходит при 0 °С. Таким образом, располагаемый температурный напор на экваторе составляет порядка 27–29 °С, а в средних широтах эта величина снижается до 15–20 °С.

В своем пограничном слое океан и атмосфера затрачивают на вращение Земли примерно пятую часть располагаемого температурного напора, остальное приходится на атмосферу.

Таким образом, основное количество тепловой энергии, способной быстро преобразовываться в кинетическую, находится в атмосфере.

Как писала американский метеоролог Джоан С. Малкус, водяной пар — это основное “горючее” атмосферы: по крайней мере в ее нижних слоях именно в процессах испарения следует искать причины, порождающие движение воздуха, то есть ветер. Ветер, в свою очередь, воздействует на море, и при этом происходит прямая передача механической энергии морю. Эта энергия и является главной причиной, порождающей генеральные системы поверхностных океанических течений и морские волны [22].

В отличие от океана, в атмосфере подогреваются нижние слои, что способствует естественной циркуляции потоков. В нижних широтах возникают устойчивые циркуляционные ячейки (ячейки Гадлея), в средних широтах проявляются слабые циркуляционные ячейки (ячейки Фарреля). Зональная циркуляция дополняется восточными ветрами в экваториальной зоне и западными — в средних широтах. Различные крупномасштабные турбулентные образования типа циклонов, антициклонов и волновых структур в зональных потоках обеспечивают требуемый перенос тепла и момента количества движения [36–38].

Вместе с тем, ряд аспектов общей циркуляции атмосферы не получил должного теоретического объяснения. В частности, условия зарождения и

рассеивания кинетической энергии потоков никак не связываются с изменением скорости вращения Земли. Кроме того, физическая модель процессов разрабатывалась без учета состояния атмосферы в ледниковые периоды. Без реконструкции климатических условий прошлого невозможно понять наблюдаемые сегодня изменения погоды и климата.

Рассмотрим основные зоны, где сейчас рождаются моменты количества движения, и установим закономерности передачи атмосферой этого количества движения Земле. Те же операции выполним для периодов оледенений и уточним, как изменялась при этом скорость вращения Земли.

Предположим, что поднимающиеся с ускорением вверх потоки влажного воздуха сообщают определенное количество движения Земле.

Поскольку, как уже говорилось, атмосфера несколько запаздывает по отношению к вращению Земли, то потоки воздуха поднимаются от поверхности океана по искривленному пути. Причем сечение потоков с высотой увеличивается. Форма каждого потока напоминает профиль изогнутого сопла Лаваля. Вектор импульса силы можно разложить на составляющие также как и в случае с вектором в пограничном слое атмосфера—океан (рис. 7). В итоге выделенная нами горизонтальная часть реакции импульса должна способствовать вращению Земли. Вместе с тем, данная схема энергетических преобразований справедлива лишь для спокойных условий, не нарушаемых какими-либо возмущениями в атмосфере. С появлением горизонтальных или вихревых воздушных течений наклон вертикальных потоков может изменяться в ту или другую сторону. При наклоне навстречу вращению Земли вертикальный поток теплого воздуха сообщает ускорение Земле, в противном случае — замедляет ее вращение.

3.1. ГАЗОДИНАМИКА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПАРОВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Рассмотрим распределение воздуха в низких широтах. Оседающий в зоне высокого давления воздух частично возвращается в экваториальный пояс в виде пассатов — самых устойчивых на Земле ветров. Пассаты движутся к экватору с северо-востока в северном полушарии и с юго-востока — в южном.

Время движения пассатов от 30° широты до экватора — около трех недель, скорость течения — $5-8$ м/с, скорость меридионального смещения — 2 м/с. За это время пассаты нагреваются и насыщаются влагой. Основная конденсация водяного пара происходит в поясе экваториальной депрессии, расположенном от 0 до 20° северной широты. Сходимость пас-

сатов северного полушария с пассатами южного полушария усиливает вертикальное движение воздуха. В результате конденсации водяного пара развиваются гигантские башни кучевых облаков, достигающие 10–11 км, а иногда и 15 км. Эти башни часто называют тепловыми из-за большого количества кинетической энергии, образующейся при конденсации водяного пара. Подсчитано, что количество этой энергии намного превышает количество кинетической энергии всех ветров и воздушных потоков на планете [21]. Направление движения пассатов обеспечивает при их встрече наклон тепловых башен в сторону, противоположную направлению вращения Земли. В этом случае горизонтальная составляющая импульса реактивной силы, создаваемой башнями, сообщает Земле дополнительное количество движения.

Итак, именно в экваториальной зоне Земля приобретает свой основной момент количества движения.

В этой ситуации термический КПД подъемных каналов высотой от тонкого пограничного слоя атмосферы и до зоны образования облаков возрастает до 7,8 %. Внутренний КПД несколько снижается, поскольку высота подъемного канала значительная и скорости движения в нем паровоздушного потока высокие. То и другое приводит к ощутимым потерям энергии на трение.

В башнях преобразуется не только тепло поверхностного слоя воды зоны депрессии, но и тепло водяного пара, привнесенного к экватору из прилегающих широт. В отличие от тонкого пограничного слоя, где расчет велся по треугольной диаграмме, здесь вычисления проводятся по обычным тепловым диаграммам, которые применяются к паровым турбинам (см. следующую главу).

Тем не менее, степень участия тепловых башен в увеличении момента количества движения Земли определяется гидродинамической обстановкой, создаваемой горизонтальными воздушными потоками, граничащими с зоной депрессии. Поэтому для квалифицированной оценки количества энергии, получаемого Землей, необходимы дополнительные исследования гидродинамики потоков в экваториальной зоне Земли.

3.2. ГАЗОДИНАМИКА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ ГОРНЫХ ХРЕБТОВ

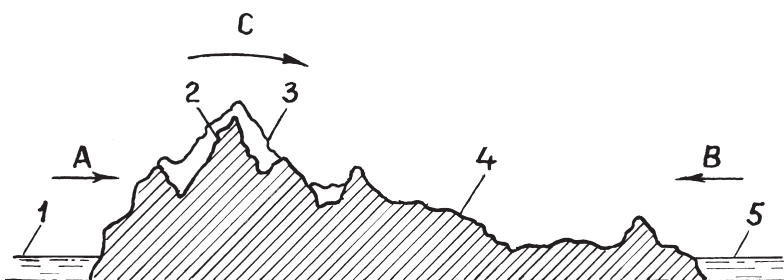
Иная ситуация складывается с той частью тепловых потоков, что перемещается воздушными массами через средние широты в Арктику и Антарктику. Выделим период года, когда в средних широтах северного полу-

шария преобладают теплые юго-западные и западные ветры. Причем потоки теплого воздуха, как и потоки теплой воды, движутся, опережая вращение Земли и отклоняясь к северу за счет сил Кориолиса.

Предположим, что на Североамериканский континент со стороны Тихого океана натекают теплые потоки воздуха. Проследим их взаимодействие с горным хребтом Кордильеры.

При охлаждении воздушного потока в предгорьях хребта водяной пар, содержащийся в нем, конденсирует. В этот момент давление воздуха в потоке падает, и поток развивает высокую скорость. При входе в пространство между гор поток замедляет свое движение. Резкое торможение приводит к преобразованию кинетической энергии потока в потенциальную. В результате на поверхности ледников развивается давление, значительно превышающее давление воздуха в зоне формирования потока над Тихим океаном. Холодный воздух, поднявшись над горами, стекает затем на океан.

Вполне возможно, что на материк с противоположной стороны поступают потоки влажного воздуха, возникшие над Атлантическим океаном. Как уже упоминалось, основная часть из них направляется в северо-восточном направлении, но ряд потоков устремляется на запад к Кордильерам. Этим воздушным течениям приходится преодолевать значительные расстояния над равниной, где при охлаждении ими теряется большая часть влаги. В результате давление воздуха, формируемое на восточных склонах, оказывается существенно ниже, чем давление торможения потока на западных склонах хребта. Как следствие возникает крутящий момент, ускоряющий вращение Земли (рис. 14).



1— Тихий океан; 2— вершины Кордильер; 3— ледник; 4— материк; 5— Атлантический океан; А — поток влажного воздуха с запада; В — поток влажного воздуха с востока; С — направление действия крутящего момента.

Рис. 14. Сечение Североамериканского континента

Поясним сказанное рядом примеров. Струя газа, направленная на преграду, преобразует свою кинетическую энергию в потенциальную. При этом восстановленное у преграды давление газа составляет максимум 70–80 % от первоначального давления (рис. 15) [39].

Картина меняется в случае торможения струи пара, охлаждаемого водой. В результате конденсации пара скорость парожидкостной смеси возрастает, что при встрече струи с преградой или замкнутым пространством обеспечивает повышение давления смеси до уровня, значительно превышающего уровень давления исходного пара (рис. 16).

Рассмотрим данный процесс на основе термодинамических диаграмм. Как показывает анализ цикла в системе координат $i-S$, давление смешанного потока может быть выше давления пара только в том случае, если прямая идеального процесса конденсации, соединяющая точки начального состояния взаимодействующих сред, проходит в области высоких изобар по сравнению с изобарами начального их состояния (рис. 17) [40].

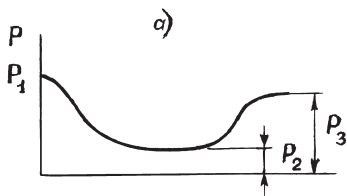
Пароводяной инжектор использован нами для закачивания холодной воды, находящейся при атмосферном давлении, в водородный реактор высокого давления с помощью струи пара, взятого из того же реактора [41]. Приобретен также значительный опыт эксплуатации подобных устройств в котлах различного типа [42]. Коэффициент преобразования инжекторами тепловой энергии в кинетическую не превышает 0,5–0,6 %. Поскольку температурный уровень природного пара ниже, чем промышленного, то при равных температурных перепадах термический КПД природного инжектора значительно выше промышленного. Но, с другой стороны, плотность природного пара значительно ниже промышленного, что, как мы уже знаем, снижает величину внутреннего КПД. В итоге величины общих КПД обоих типов инжекторов примерно равны друг другу. В промышленных инжекторах рабочим телом является водяной пар, а компримируемым — вода. Вода, как известно, не изменяет своего объема при сжатии.

В природных инжекторах рабочим телом служит также водяной пар, а сжимаемым — воздух. Воздух — упругое тело, изменяющее свой объем при сжатии.

Данное обстоятельство приводит к различной эффективности природных и промышленных инжекторов.

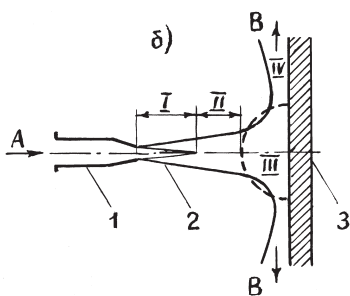
Если, например, транспортные инжекторы способны повысить давление воды в 10–15 раз, то природные при том же КПД создают давление воздуха в горах, всего в 1,5–2 раза превышающее давление над океаном.

О возможном уровне давления торможения можно судить по скоростям перемещения ураганов и тайфунов, действующих по тому же физиче-



P_1 – начальное давление воздуха; P_2 – давление в струе, выходящей из сопла; P_3 – давление заторможенного потока над плоской стенкой.

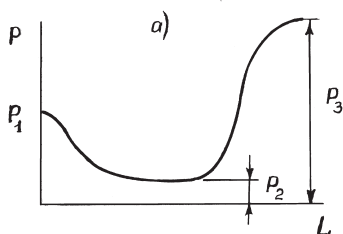
Рис. 15 а. Изменение давления по длине воздушной струи



1 – воздушное сопло; 2 – струя; 3 – плоская стенка; А – вход воздуха; В – отток заторможенного потока.

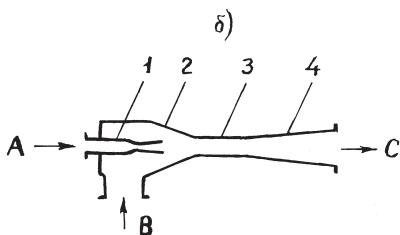
Области течения: I – начальный участок; II – основной участок; III – зона поворота потока; IV – зона установившегося радиального течения.

Рис. 15 б. Схема натекания осесимметричной струи на плоскую стенку



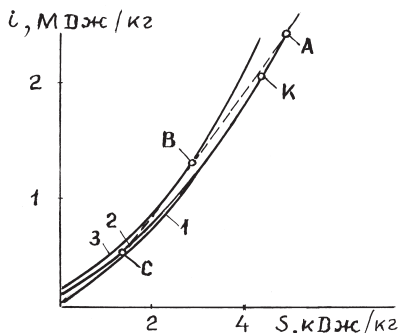
P_1 – давление пара; P_2 – давление смешанного потока в цилиндрической части сопла; P_3 – давление заторможенного потока на выходе из диффузора.

Рис. 16 а. Изменение давления по длине проточной части пароводяного инжектора



1 – паровое сопло; 2 – камера холодной воды; 3 – цилиндрический участок; 4 – диффузор; А – вход водяного пара; В – вход холодной воды; С – выход заторможенного потока.

Рис. 16 б. Схема пароводяного инжектора с цилиндрической камерой смешения



1 — пограничная кривая ($x = 0$);
 2, 3 — изобары низкого и высокого давления; А — насыщенный пар при низком давлении ($x = 1$);
 С — холодная вода при низком давлении; К — критическая точка;
 В — точка касания линии идеального обратимого процесса конденсации пара при смешении потоков с изобарой высокого давления; штриховая линия — линия обратимого смешения

Рис. 17. Компрессионный цикл обратимой конденсации струи пара при взаимодействии с холодной водой

скому принципу. Наблюдаемые в атмосфере динамические структуры, например циклоны (рис. 18), возникают в результате совместных усилий гравитационного, ротационного и компрессионного эффектов.

Из опыта эксплуатации промышленных инжекторов следует, что природный компрессионный эффект возникает лишь при значительной разности температур между потоком влажного воздуха и ледником.

Ясно, что максимально возможный температурный напор будет наблюдаться для ледников, расположенных в низких и отчасти в средних широтах.

Другая и, пожалуй, основная особенность природного инжектора заключается в том, что компрессионный эффект возникает внезапно при достижении системой определенного сочетания параметров, и также внезапно исчезает при отклонении от этого сочетания.

Из приведенных выкладок следует, что горный хребет Кордильеры, протянувшийся с севера на юг по американским континентам на расстоянии 18 тысяч километров, действует как высокоэффективная лопатка турбины, ускоряющая вращение Земли.

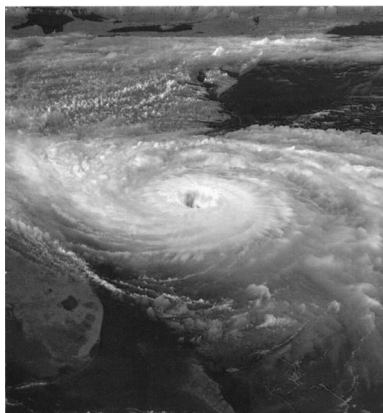


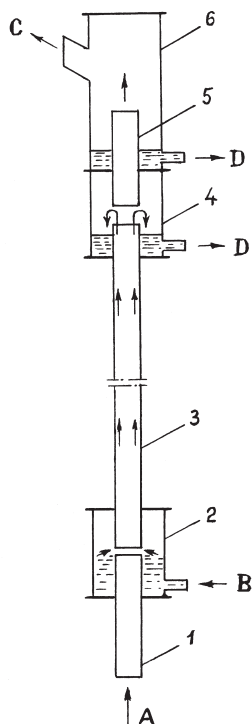
Рис. 18. Циклон (снимок NASA)

Заметный вклад в этот процесс вносит Гренландия, на ледниках которой конденсируется влага теплых воздушных течений, поступающих через территорию восточных штатов США с Мексиканского залива и Карибского моря.

Обратимся к анализу воздействия атмосферы в зоне горных хребтов Евразии и Африки на скорость вращения Земли. Как видим, оба континента в своих южных и средних широтах обрамлены горами. Это создает благоприятные условия для возникновения компрессионных эффектов и их взаимной компенсации.

Однако в этой общей закономерности есть одно существенное отклонение. Как известно, вблизи экватора преобладают восточные ветры, но на участке “пустыня Сахара—горы Гималаи” наблюдаются, особенно в весеннее время, устойчивые западные ветры. Потоки воздуха, нагреваясь над песками Африки, устремляются в восточном направлении и, пройдя над Красным и Аравийским морями, сталкиваются с мощным горным хребтом на Индостанском полуострове. Над морями потоки насыщаются влагой.

Рассмотрим этот процесс на примере испарения воды в потоке воздуха. Возьмем за основу процесс в пленочных испарителях. Предположим, вода увлекается вверх в виде пленки высокоскоростным газовым потоком, движущимся по вертикальной трубке (рис. 19). Исследуем закономерности данного процесса в экстремальных условиях, когда температура воздуха достигает 150–200 °С, а воды — 70–75 °С. Оказалось, что поток воздуха, движущийся в трубке Φ , $18,1 \times 10^{-3}$ м со скоростью 20–35 м/с, уже на длине 1,2 м



A — вход сухого воздуха; B — вход воды; C — выход влажного воздуха; D — выход воды; 1 — входной участок трубки; 2 — емкость воды; 3 — рабочая трубка; 4 — сепаратор; 5 — отбойный участок трубки; 6 — дополнительный сепаратор.

Рис. 19. Схема устройства для исследования теплообмена между потоком горячего воздуха и поднимающейся пленкой воды

снижает свою температуру до 45–47 °С. Аналогично поступает пленка воды, текущая вверх по внутренней стенке трубки со скоростью 0,2–0,3 м/с. Влажность воздуха возрастает с 1–2 % до 100 % [43].

Как видим, на испарение затрачивается как тепло воздушного потока, так и тепло воды.

Отсюда следует, что западные ветры расходуют на свое насыщение влагой как собственное тепло, полученное над Сахарой, так и тепло морей, над которыми они проносятся. В итоге ветры несут в себе громадное количество воды. В предгорьях Гималаев постоянно идут самые сильные на земном шаре дожди. Следовательно, именно здесь рождается мощный крутящий момент, передаваемый атмосферой Земле.

Для замыкания циркуляционной ячейки поток охлажденного воздуха, отдав влагу ледникам, должен подняться вверх по склонам хребта и отправиться в обратный путь к Африке.

Крутящий момент подобного уровня не может возникнуть при ветровой нагрузке гор со стороны Тихого океана. Дело в том, что океан и атмосфера обладают способностью к саморегулированию испарения воды. Как только интенсивность лучистой энергии Солнца возрастает и испарение увеличивается, над океаном появляются облака. Эти облака отражают большую часть поступающей энергии, и испарение воды вновь снижается.

Над африканской же пустыней небо всегда безоблачно. Можно сказать, что тепло Сахары вращает Землю.

Для количественной оценки крутящего момента необходимо иметь полные сведения о скорости течения и влажности воздуха, температурных условиях в атмосфере и океане, значениях поверхности и объема ледников, величине пространства между горами хребта, сезонных изменениях климата, инерционных свойствах масс атмосферы и Земли.

Говоря о последних двух параметрах, следует отметить, что динамические возможности атмосферы довольно ограничены, поскольку ее масса составляет менее одной десятитысячной доли процента массы Земли. К тому же с внешней стороны атмосфера граничит с космосом, и поэтому при передаче количества движения Земле ей, по сути дела, не на что “опереться”.

Но следует учитывать, что атмосфера находится на расстоянии 6400 км от центра Земли. При таком радиусе действия силы, развиваемые высокоскоростными потоками влажного воздуха в горах, создают существенный крутящий момент.

3.3. АТМОСФЕРА В ПЕРИОДЫ ПОХОЛОДАНИЙ И ПОТЕПЛЕНИЙ

Степень воздействия тепловых процессов в атмосфере на скорость вращения Земли можно оценить косвенно по периодам возникновения и исчезновения ледников.

С ростом площади и объема ледников в приземном слое возникают ураганные ветры. Включаются в действие компрессионный и ротационный эффекты. Совместными усилиями океан и атмосфера за несколько миллионов лет разгоняют Землю до максимально возможного числа оборотов. Мощные теплые течения устремляются из экваториальной зоны к полюсам. Одновременно изменяется химический состав атмосферы. Как известно, в каждом м³ морской воды при 4 °С растворено до 1,5 м³ диоксида углерода [44]. По оценкам экспертов, содержание диоксида углерода в мировом океане в 50 раз превышает его содержание в атмосфере [45]. Вода, изымаемая из океана на формирование ледниковых щитов, отдает свой диоксид углерода атмосфере. Приток дополнительного тепла с водными потоками и усиление парникового эффекта вызывают таяние арктических и антарктических льдов. На материках в средних широтах начинается оттепель, ледниковые щиты постепенно исчезают. Ураганные ветры затихают, одновременно с ними исчезает компрессионный эффект, то есть причина, вызывающая ускорение вращения Земли.

Между тем, Земля еще некоторое время по инерции продолжает вращаться с прежней скоростью, обеспечивая тем самым мягкий климат на всей своей поверхности. Избыток диоксида углерода в атмосфере стимулирует развитие биосферы.

Но трение потоков в океанах и атмосфере постепенно снижает число оборотов Земли. Теплые течения ослабевают, и вместе с ними ослабевает ротационный эффект.

В средних широтах наступает похолодание. Происходит интенсивное поглощение атмосферного углекислого газа холодной водой океанов, парниковый эффект также ослабевает. Как предвестники ледникового периода в горах зарождаются ледники. Ураганные ветры вновь обрушиваются на высочайшие горные хребты. Возникает компрессионный эффект и усиливает свое действие ротационный. Резко возрастает темп распространения ледниковых щитов. Земля начинает набирать число оборотов вокруг своей оси. Планета в очередной раз вступает в свой климатический цикл.

Сведения об отклонении числа оборотов Земли от некоторого постоянного значения можно получить по палеонтологическим данным путем

подсчета числа дней в году и в месяце в течение геологического прошлого. Такой подсчет проводят, изучая структуру срезов девонских кораллов. Эти кораллы имеют дневные ростовые кольца, аналогичные годовым кольцам деревьев; кроме того, у кораллов дневные ростовые кольца накладываются на месячные и годовые ростовые узлы. Подсчет этих колец позволил установить, что в период появления тропической растительности в Антарктиде и на островах Шпицбергена в Арктике Земля вращалась со скоростью 400 оборотов в год. Частая смена дней и ночей также способствовала более равномерному распространению тепла на Земле. Девонский период отстоит от сегодняшнего на 400–500 млн лет [46, 47].

Оледенения наступали с интервалами примерно в 150 млн лет. Наблюдается некоторая корреляция периодов орогенеза с периодами оледенений [48, 49]. Влияя на интервалы изменений климата, горообразование, тем не менее, не в состоянии их предотвратить. Таким образом, оледенения являются необратимым процессом. Установление факта наличия высокой скорости вращения Земли в древние времена приводит в рамках развиваемой здесь теории к ряду очевидных следствий.

Так, отдельная достаточно массивная гряда гор, вновь возникшая на каком-либо материке, может изменить розу ветров и спровоцировать рост ледников. Естественно, при этом возникает компрессионный эффект. Если направление действия этого эффекта противоположно направлению вращения Земли, то в течение сравнительно короткого интервала геологического времени Земля замедлит свое движение. Последнее обстоятельство приведет к потере Землей гироскопического эффекта.

Под воздействием Луны и Солнца плоскость экватора Земли, наклоненная в настоящее время к эклиптике на $23,5^\circ$, развернется и займет положение, совпадающее с плоскостью орбиты Солнца. Именно по этой причине в древние времена наблюдалось значительное смещение полюсов Земли. Данные о смещении полюсов получены на основе палеомагнитных измерений.

Становится также понятной природа наводнений и “всемирных потопов”. При замедлении вращения Земли океан будет некоторое время по инерции продолжать свое движение с прежней скоростью. В результате, например, Европа и Средний Восток погрузятся в морские пучины, а от берегов Китая море должно отступить.

Возможность предвидения столь катастрофических явлений целиком зависит от расшифровки законов горообразования. Представленная во второй части данной книги термодинамика литосферы во многом проясняет картину земных процессов. Между тем, сегодняшние сведения о скоро-

сти вращения Земли довольно противоречивы, и к тому же большинство из них ограничено периодом исторического времени. Как установлено, Земля вращается неравномерно. Эта неравномерность включает вековое замедление вращения Земли (сутки увеличиваются на 1–2 мс в столетие), небольшие сезонные изменения скорости вращения (быстрее всего Земля вращается в августе и медленнее всего — в марте) и, наконец, неправильные скачкообразные изменения скорости вращения (на порядок превосходящие вековые изменения).

Среди причин, вызывающих колебание полюсов и неравномерность вращения Земли, перечислены: сезонные смещения воздушной массы, перемещение материков, таяние ледников, упругие свойства Земли и конвективные движения в жидком ядре Земли.

Считается, что вековые изменения скорости вращения Земли за последние несколько тысячелетий вызваны приливным трением, но и здесь изменения момента количества движения (связанные, как предполагается, с изменением уровня моря) играют существенную роль.

В последнее время величину приливных сил, возникающих в результате воздействия Солнца и Луны, оценивают по возмущениям в движении искусственных спутников Земли [50, 51].

Ориентация лишь на данные исторического времени и пренебрежение термодинамическими методами исследования природных процессов не позволили авторам цитируемых выше работ вскрыть причины глубоких климатических изменений в древние времена. Природа скачкообразных изменений скорости вращения Земли также не нашла удовлетворительно объяснения.

Тем не менее, приведенные в литературных источниках [50, 51] наблюдательные данные крайне важны для построения прогнозов дальнейшего развития климата на Земле. Из этих данных следует, что сейчас ритмы оледенений и потеплений не проявляют себя в колебаниях скорости вращения Земли так, как это было в древние времена. Таким образом, на Земле происходят необратимые изменения.

Укажем на два таких изменения.

3.4. ПРИЧИНЫ СОКРАЩЕНИЯ ПЕРИОДОВ ОЛЕДЕНЕНИЙ

Остановимся на первой причине — на поведении океана в геологическое время.

Береговая линия, отделяющая сушу и море, является весьма непостоянной границей. Эта граница меняется в зависимости от того, уменьшает-

ся ли количество воды в океане, когда происходит рост материковых ледниковых щитов, или же, наоборот, увеличивается, когда происходит таяние ледников (рис. 20) [52]. Как видим, за многие сотни миллионов лет интервалы времени возникновения и исчезновения ледников изменялись слабо, но конечный уровень воды в океанах от цикла к циклу снижался. Последнее обстоятельство приводит к ухудшению циркуляции воды в океанах и, как следствие, к уменьшению количества движения, передаваемого Земле от Мирового океана в результате действия ротационного эффекта. В итоге Земля должна замедлять свое вращение.

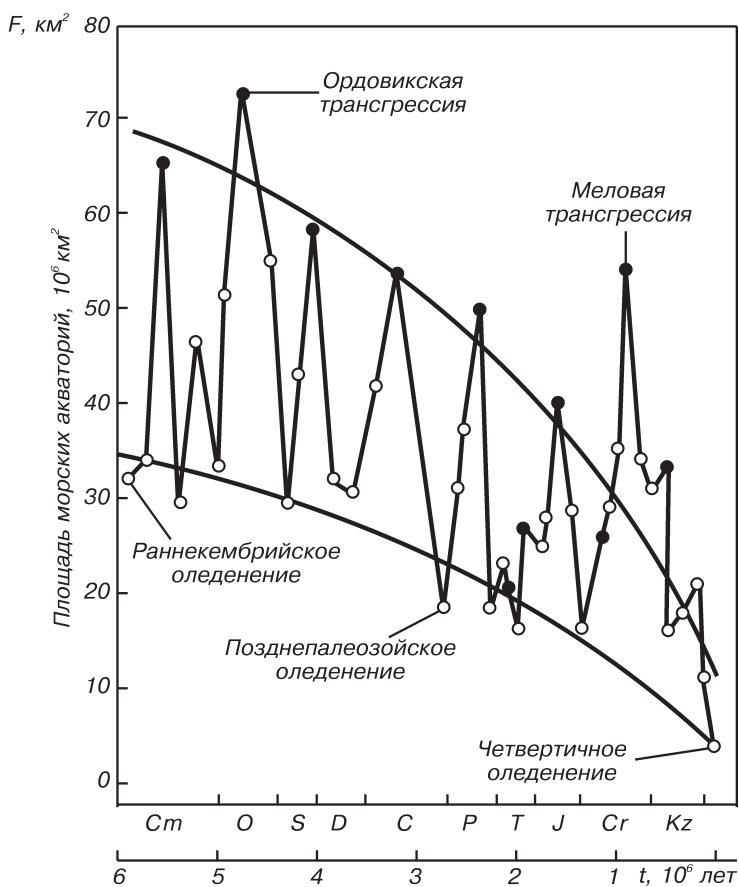


Рис. 20. Кривая осушения континентов в течение фанерозоя

Другая причина связана с перемещением материков. После того как Африка примкнула к Азии, в традиционной структуре энергообмена “океан—атмосфера—горы” возник новый элемент “пустыня—атмосфера—океан—горы”. Этот элемент резко повышает количество движения, передаваемого атмосферой Земле в результате действия компрессионного эффекта, что в итоге должно ускорять вращение Земли.

Ослабление ротационного эффекта и усиление компрессионного привело систему в некоторое стационарное состояние с неправильным скачкообразным изменением скорости вращения Земли в течение года. По-видимому, это же обстоятельство сократило периоды оледенений с десятков миллионов лет до десятков тысяч лет.

3.5. ОСОБЕННОСТИ ВРАЩЕНИЯ МАРСА

Как известно, колебания механических систем происходят как вблизи устойчивых положений равновесия, так и вблизи устойчивых движений. При описании некоторого конкретного движения механической системы неизбежно решается вопрос о действующих силах. Так, в соответствии с установленными нами принципами планета, обладающая газожидкостной оболочкой, должна вращаться вокруг своей оси под воздействием сил ротационного эффекта.

Те же принципы термодинамики говорят о том, что число оборотов планеты с газожидкостной оболочкой и горными хребтами колеблется возле некоторой постоянной величины под воздействием сил компрессионного эффекта.

Как свидетельствует анализ вращения Земли и Юпитера, не составляет особого труда по предложенной методике определить величины действующих в том и другом случае сил.

Таким образом, располагая сведениями о мощности источников энергии, массе планеты и свойствах среды, образующей атмосферу и океан, мы в состоянии судить о числе оборотов небесного тела. Справедливо, естественно, и обратное утверждение: по числу оборотов планеты и ее массе можно сделать заключение о наличии у нее газожидкостной оболочки и мощности используемых ею для вращения источников энергии.

Проверим справедливость этого утверждения на ряде планет и их спутниках. Поскольку Луна синхронизировала вращение вокруг своей оси с Землей, а Меркурий — с Солнцем, то можно, даже не исследуя эти небесные тела, говорить об отсутствии у них газожидкостной оболочки. Венера, как известно, обладает тяжелой газовой оболочкой. Но данное обстоятельство не избавляет эту планету от необходимости согласования

своего вращения с Землей. Один оборот вокруг своей оси Венера делает за 243 земных суток.

В то же время скорость вращения Марса лишь незначительно отличается от скорости вращения Земли. Но Марс на данный момент не имеет газожидкостной оболочки, а атмосферное давление на его поверхности не превышает 0,006 атм. Тем не менее, с момента формирования Солнечной системы и до сих пор Марс не синхронизировал свое вращение с движением ближайших планет.

Разумно будет предположить, что на ранней стадии своего развития Марс обладал океаном и более плотной, чем сейчас, атмосферой. Однако наличие газожидкостной оболочки еще не означает, что планета должна вращаться с высокой скоростью. Необходимо найти источник энергии для обеспечения этого вращения.

Условия образования рассматриваемой нами планеты мало отличались, по-видимому, от земных. К тому же ее масса составляет десятую долю массы Земли. В связи с этим не следует ожидать поступления значительного количества энергии из недр самого Марса. С другой стороны, плотность солнечного излучения на Марсе в три раза ниже, чем на Земле. Этой энергии Марсу не хватает даже для того, чтобы растопить ледяные шапки на своих полюсах.

В этой связи напрашивается вывод о том, что на небосклоне молодого Марса была еще одна звезда, снабжающая его достаточным для вращения количеством энергии.

Из ближайших соседей более всего для этой роли подходит Юпитер. Не исключено, что в то же самое время, когда на Марсе существовали океан и более плотная атмосфера, Юпитер был звездой.

Суммарная плотность потока энергии, поступающей в то время на Марс, лишь немногим отличалась от плотности потока солнечной энергии, получаемой в настоящее время Землей.

Наличие гор у Марса приводило к пульсации скорости его вращения.

С угасанием Юпитера как звезды марсианский океан превратился в ледники. Процесс образования ледниковых щитов произошел, по-видимому, за короткий промежуток времени, что не позволило трению потоков в атмосфере и океане снизить число оборотов Марса.

Надо сказать, что и Земля, получая дополнительное количество лучистой энергии от Юпитера, вращалась с гораздо большей скоростью, чем сейчас.

Прямое указание на то, что Юпитер был звездой, приводит нас к необходимости детального анализа начальных условий формирования Солнечной системы.

ВЫВОДЫ

Подведем итог рассмотрению затронутой проблемы. Процесс вращения Земли неустойчив по отношению к воздействию массовых сил, возникающих при перераспределении тепла в атмосфере и океане. Неустойчивость выражается в изменении числа оборотов Земли, что, в конечном счете, приводит к вековым колебаниям климата. Среди массовых сил наиболее значительными являются силы компрессионного эффекта. Эффект появляется в результате торможения в горах насыщенных влагой высокоскоростных воздушных потоков.

Спонтанное появление компрессионного эффекта обуславливает скачкообразные изменения скорости вращения Земли в течение года.

Океан участвует в ускорении вращения Земли за счет испарения воды со всей поверхности средних и нижних широт, в то время как атмосфера воздействует на этот процесс локально в зависимости от расположения очагов тепла и гор. Основную часть механической энергии атмосфера сообщает Земле в экваториальной зоне, а также в районах расположения горных хребтов, в частности, Кордильер и Гималаев. Остальную часть Земля воспринимает за счет трения потоков о свою поверхность при сезонном перераспределении воздушных масс. И только в периоды похолоданий импульс силы, сообщаемый Земле атмосферой, возрастает пропорционально увеличению температурных напоров и поверхности ледников. Основным "горючим" атмосферы является водяной пар.

Полученный момент количества движения Земля затрачивает на нагнетание холодных потоков воды и воздуха с полюсов к экватору.

Горообразование в состоянии изменить направление действия компрессионного эффекта, что, как правило, сопровождается изменением наклона оси вращения Земли. Последнее обстоятельство приводит к катастрофам, таким, как оледенения, землетрясения и наводнения.

ОКЕАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В предыдущих разделах мы оценили эффективность действия земного шара как устройства, преобразующего тепло океана и атмосферы в работу, затрачиваемую на циркуляцию потоков. Согласно установленному механизму, вначале компрессионный эффект обеспечивает незначительную “закрутку” Земли. Затем включается в действие ротационный эффект и за сравнительно короткое время выводит Землю на требуемое по тепловому балансу число оборотов.

Причем ротационный эффект нечувствителен к направлению вращения планеты: Земля получает ускорение в том направлении, в котором действовали силы первоначальной закрутки.

Оба эффекта возникают лишь в динамических условиях, т. е. связаны с подводом и отводом тепла при течении потоков.

Особенностью рассматриваемой системы является то, что реакция, возникающая в результате испарения и конденсации воды, сообщает Земле ровно столько механической энергии, сколько ей необходимо для поддержания постоянной скорости вращения вокруг своей оси.

Это положение вытекает из того факта, что в создавшихся условиях не наблюдается какого-либо перегрева Земли. Следовательно, всю получаемую от Солнца лучистую энергию Земля отправляет вновь в космос. По той же причине Земля не может накапливать и механическую энергию. Слабое колебание скорости вращения Земли служит наглядным тому подтверждением.

Как видим, поведение Земли крайне чувствительно к притоку энергии от Солнца и ее стоку в космос.

Отсюда становится понятным, почему формирование горных хребтов так резко влияет на колебание климата на Земле. Помимо горообразования, число оборотов Земли может изменяться в результате извержения вулканов и падения астероидов. В первом случае в атмосфере создается слой витающих частиц пепла, отражающих солнечные лучи, а во втором —

из глубин океана на поверхность поднимаются потоки холодной воды. То и другое надолго нарушает тепловой баланс планеты.

Перечисленные природные явления можно предвидеть, но нельзя предотвратить. Иная ситуация с рассматриваемым нами искусственным отбором энергии из океана.

Конечной целью нашего исследования, как уже говорилось, является получение данных для проектирования океанических электростанций (ОЭС).

Для достижения поставленной цели нам необходимо решить ряд серьезных задач.

Во-первых, следует доказать, что извлечение значительных количеств энергии из океана не приведет к изменению сегодняшнего динамического состояния Земли. Главное здесь — избежать нарушения скорости вращения Земли, что, как мы уже знаем, может повлечь за собой радикальные климатические преобразования.

Во-вторых, необходимо показать, что количество получаемой из окружающей среды энергии имеет промышленное значение.

И наконец, желательно найти оптимальный вариант транспорта энергии на объекты, расположенные на расстоянии сотен и тысяч километров от ОЭС.

Решению перечисленных задач посвящены последующие разделы монографии.

4.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ

Произведем приближенную оценку времени, в течение которого океан и атмосфера могут повысить скорость вращения Земли с 365 до 400 оборотов в год.

Воспользуемся для этого известными данными. В частности, подсчитано, что сезонные вариации земных суток с амплитудой около 0,5 мс соответствуют скорости изменения кинетической энергии вращения Земли на величину [51]

$$N_{0,5} = A/\tau = 10^{15} \text{ Дж/с},$$

где A — работа, Дж; τ — время, с.

Запись размерности величины $N_{0,5}$ означает, что для сокращения продолжительности земных суток на 0,5 мс необходим источник энергии с мощностью 10^{15} Дж/с [53].

Поскольку $1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}$, то мы можем записать

$$N_{0,5} = 10^3 \text{ ТВт.}$$

Примем количество ежегодно испаряющейся воды на уровне [22]

$$M = 350000 \text{ км}^3$$

или в удобной для нас размерности

$$M = 1,11 \times 10^{10} \text{ кг/с.}$$

Определяем мощность океана и атмосферы по формуле

$$N = \eta \times Q,$$

где N — мощность, Вт;

η — КПД преобразования тепловой энергии в механическую;

Q — поток тепла, уходящего с водяным паром в атмосферу, Вт.

В экваториальной зоне вода испаряется при 28°C . Для этих температурных условий по справочным данным, пренебрегая атмосферным давлением, находим значение удельной теплоты парообразования

$$r = 2425,6 \text{ Дж/кг.}$$

Рассчитываем поток тепла, поступающий в атмосферу с водяным паром

$$Q = r \times M = 26,91 \text{ ТВт.}$$

Допустим, что действует лишь ротационный эффект, с КПД преобразования тепловой энергии в механическую в пограничном слое океан—атмосфера

$$\eta = 0,25 \text{ \%}.$$

Тогда получаемая за счет испарения воды мощность будет

$$N = \eta \times Q = 0,067 \text{ ТВт.}$$

Полученные значения N существенно ниже величины $N_{0,5}$.

Здесь следует подчеркнуть, что мощность определяется быстротой совершения работы. Для равномерно работающей системы, каковой является Земля, мощность измеряется работой, совершаемой в единицу времени. Естественно, что ту же самую работу $A = 10^{15} \text{ Дж}$ не обладающая высокой мощностью система выполнит за более длительное время.

По сути дела, время необходимо увеличить в Z раз, где величина Z определяется из выражения

$$Z = \frac{N_{0,5}}{N} = 1,49 \cdot 10^4.$$

Таким образом, океан и атмосфера в состоянии изменить продолжительность земных суток на 0,5 мс за время

$$\tau' = Z \times \tau = 1,49 \times 10^4 \text{ с,}$$

т. е. примерно за 4,14 часа.

Далее после несложных расчетов находим, что скорость вращения Земли изменяется на 1 с за один год, на один оборот за 86,4 тыс. лет и на 35 оборотов в году через 3 млн лет.

Но в настоящее время Земля находится в некотором динамическом равновесии, характеризующимся постоянством скорости вращения. Большую часть получаемой механической энергии планета затрачивает на перемещение масс воды и воздуха с полюсов к экватору и обратно. Определенное количество вырабатываемой энергии Земля расходует, по-видимому, на предотвращение синхронизации своего вращения с движением ближайших планет и, в первую очередь, с наиболее массивной из них — Юпитером.

Не нужно забывать, что основная часть тепловой энергии, способной при определенных условиях быстро преобразоваться в кинетическую энергию потоков, находится в атмосфере. В сложившихся условиях крайне важно во время отбора энергии из океана не спровоцировать возникновения и роста ледников. По достижении некоторой критической массы ледниковых щитов резко возрастут температурные перепады в атмосфере между зонами, расположенными над морями и горами. Рост поверхности ледников увеличит степень взаимодействия воздушных потоков с поверхностью Земли. Оба фактора усилят влияние компрессионных эффектов, и Земля начнет ускорять свой бег.

Отсюда появляется запрет на размещение океанических станций в районах максимальной активности компрессионных эффектов, т. е. в средних широтах Тихого океана и в северной части Индийского океана.

С тех же позиций возможных климатических изменений следует считать крайне рискованным мероприятием попытки использования энергии Гольфстрима, Куроисио, Бразильского и других теплых течений для выработки электроэнергии.

Таким образом, в нашем распоряжении остается узкая полоса, ограниченная пятым градусом северной широты и пятым градусом южной широты. Эту полосу часто называют “горячим поясом планеты”. Здесь происходят наиболее активные природные процессы, обеспечивающие отвод поступающей от Солнца энергии.

Но в определенные периоды года установившийся механизм циркуляции потоков явно не справляется со своей задачей. В итоге “избыток”

энергии “выплескивается” в средние широты в виде энергии неконтролируемых ураганов и тайфунов.

Наша задача — умело взять этот “излишек” энергии, что, очевидно, не нарушит скорость вращения Земли.

Итак, определив места размещения ОЭС, мы частично приблизились к решению первой из поставленных задач.

Окончательное решение связано со статистическим расчетом количества кинетической энергии, ежегодно выносимого ураганами и тайфунами из экваториального пояса планеты. Объем механической энергии, извлекаемой нами с помощью ОЭС, не должен превышать значения, найденного в результате статистического расчета.

К сожалению, природные динамические структуры имеют переменные параметры, что не позволяет получить достаточно надежные статистические данные. Скорее всего, число и мощность ОЭС будут подбираться экспериментальным путем.

На данном этапе исследований попытаемся, используя наши общие представления об энергетических процессах, найти то минимальное количество энергии, которое мы можем извлечь из “горячего” пояса океана.

На первый взгляд кажется, что общая мощность океана $N = 0,067$ ТВт, рассчитанная по массе ежегодно испаряемой воды, весьма незначительна, если сравнить ее с установленной мощностью электростанций Мира, составляющей $N_m = 3$ ТВт [54].

Однако в нашем случае речь идет о тепловой энергии, уже запасенной океаном за многие годы поглощения солнечной радиации. Теплую воду можно рассматривать как низкокалорийное топливо. Подтвердим свою мысль несложными расчетами.

Как известно, плотность потока солнечной энергии составляет [22]

$$q = 153,4 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \times \text{с}).$$

Водная поверхность теряет столько же тепла, сколько океан получает за счет солнечной радиации. Около половины потерь приходится на обратное излучение, оставшаяся часть отправляется в атмосферу путем испарения воды, теплопроводности и конвекции.

Примем затраты на испарение равными

$$q' = 76,7 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \times \text{с}).$$

Напомним, что температура воды в поверхностном слое достигает 28°C , а на глубине 500 м снижается до 4°C . Таким образом, полезный температурный перепад составляет 24°C .

В энергетической установке, действующей по предельному термодинамическому циклу, теплая вода за счет вскипания под вакуумом охлаждается до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По справочным данным находим, что каждый м^3 воды при охлаждении от $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ теряет тепло в количестве

$$q'' = 10^8 \text{ Дж/м}^3.$$

Плавающая энергетическая установка оставляет после себя поверхностный слой воды с температурой $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это влечет за собой прекращение явных потерь тепла поверхностным слоем и уменьшение испарения. Вода начинает поглощать солнечную радиацию в количестве q' .

Отсюда время, необходимое для восстановления первоначальной емкости выбранного слоя океана, составляет

$$\tau_L = \frac{q''}{q'} \cdot L,$$

где L — высота слоя, м.

В частности, кубический метр воды восстановит свою температуру за

$$\tau'_L = 1,3 \times 10^6 \text{ с}$$

или за 15 суток. Слой толщиной $L = 100$ м придет в свое прежнее состояние за время

$$\tau''_L = 4,1 \text{ года.}$$

Отсюда следует, что суммарная мощность плавающих ОЭС должна быть выбрана таким образом, чтобы тепла, сосредоточенного в настоящее время в экваториальной зоне океана, хватило бы для выработки электроэнергии на 4,1 года. В течение этого периода Солнце восстановит емкость начальных районов отбора энергии, и флотилия станций может вновь возвратиться на начальное место и отправиться по своему прежнему маршруту.

Определим установленную мощность ОЭС.

Водная поверхность ограниченного нами пояса планеты составляет

$$F = 18 \text{ млн км}^2.$$

Эта величина равна примерно 10 % зеркала испарения океана.

Количество воды, содержащейся в поверхностном слое толщиной $L = 100$ м, составляет

$$V = L \times F = 1,8 \times 10^{15} \text{ м}^3.$$

Слой обладает тепловой энергией в количестве

$$Q'' = q'' \times V = 1,8 \times 10^{23} \text{ Дж.}$$

Примем величину минимального КПД преобразования тепловой энергии в механическую на уровне значения КПД природного термокомпрессора, действующего в горах

$$\eta = 0,5 \text{ \%}.$$

Тогда установленная мощность ОЭС будет

$$N = \frac{\eta \cdot Q''}{\tau_L} = 6,96 \text{ ТВт.}$$

Эта величина значительно превышает мощность ротационного эффекта.

Здесь уместно привести слова одного из пионеров гелиотехники Эриксона: “Архимед при помощи рычага брался поднять мир. Я же утверждаю, что, концентрируя солнечное тепло, можно получить силу, способную остановить Землю на ходу” [55].

Ранее высказывалось предположение, что малая плотность потока солнечной энергии на земной поверхности не позволяет надеяться на реализацию экономически оправданных крупных энергоустройств. Так, для того, чтобы получить 100 МВт с освещенной Солнцем поверхности, необходима площадь собирающего устройства в 1 км². В этом случае капзатраты не оправдывают полученной энергии. Кроме того, солнечная радиация имеет колебания не только суточные, но также зависимые от времени года и от погоды [56].

Но эти рассуждения справедливы для прямого превращения солнечной энергии в электрическую или механическую. При утилизации разницы температур между слоями воды в океане речь идет об уже запасенной в воде в виде тепла солнечной энергии. Солнце непрерывно восстанавливает энергетический потенциал поверхностного слоя.

Само собирающее устройство у электростанции отсутствует, его функции выполняет верхний слой воды в океане. И, наконец, прогретая в верхнем слое вода не охлаждается за ночь, а поступление солнечных лучей в экваториальную зону океана слабо зависит от времени года.

Как уже отмечалось, скорость вращения Земли крайне чувствительна к изменению теплового баланса в атмосфере и океане. Поэтому желательно сократить до минимума зону действия океанических электростанций. В дальнейшем выясним, на какую площадь экваториального пояса Земли можно рассчитывать.

Кроме того, доказав промышленное значение извлекаемой из поверхностного слоя океана энергии, мы еще не обосновывали тип двигателя, способного эффективно использовать тепло низкого потенциала. Осветим эти вопросы в следующем разделе.

4.2. АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ОКЕАНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Ранее построенные электростанции, использующие перепад температур верхних и нижних слоев воды в океане, обладают рядом весьма существенных недостатков. Так, например, применение цикла с получением пара за счет вскипания теплой воды в условиях вакуума (установка Клода, Виргинская станция и сконструированная, но не построенная Абиджанская станция) является наименее благоприятным из-за малого количества полезно используемого тепла. Кроме того, высокая металлоемкость, значительные габариты влажнопаровых турбин и их небольшая единичная мощность требуют существенных капитальных затрат, что еще больше ограничивает практическую реализацию этой проблемы [57–59].

Электростанции с низкокипящими рабочими телами (аммиак, фреон, бутан, пропан, углекислота и т. д.) позволяют увеличить удельную выработку электроэнергии, сократить габариты и стоимость турбин.

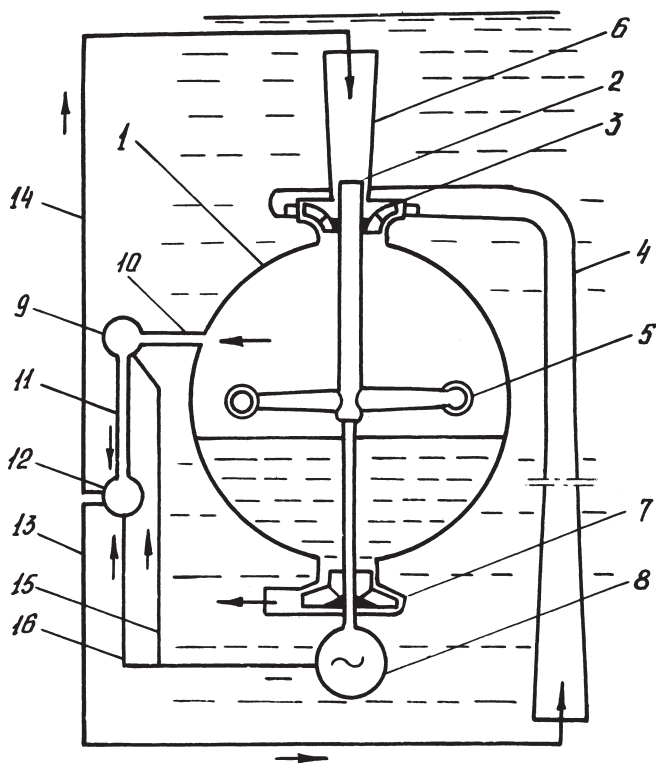
Однако и эти установки имеют ряд недостатков, основными из которых является наличие громоздкой теплообменной аппаратуры (нагреватели и конденсаторы) и необратимые потери в ней тепла, особенно ощутимые при малых температурных перепадах между теплой и холодной водой. Об этом свидетельствуют данные станций, рабочими агентами в которых служат аммиак и фреон. Так, электростанция, смонтированная вблизи Гавайских островов, смогла отдать в электрическую сеть 12–15 кВт, а на собственные нужды потратила 35 кВт. Несколько лучше показатели энергоустановки на острове Науру. Здесь в режиме максимальной нагрузки выработка электроэнергии составила 120 кВт, а отдача “чистой” мощности в сеть — 31,5 кВт. Планируется ввод в действие более мощных станций. Специалисты, разрабатывающие проекты, поставили себе цель добиться снижения расхода электроэнергии станциями на собственные нужды до 10 % от количества располагаемой энергии [60–66].

Однако этим планам не суждено сбыться. Данное обстоятельство объясняется необоснованным переносом технических решений, применяемых в традиционной энергетике, в сферу конструирования ОЭС. В частности, создатели ОЭС не учитывают энергетические ограничения, свя-

занные с применением испарителей и паровых турбин. Отрицательные свойства этих ограничений особенно четко проявляются при использовании малых разностей температур.

По нашему мнению, в энергоустановке, представленной на рис. 21, устранены недостатки, присущие электростанциям с паровыми турбинами [67–70].

Теплая вода из верхних слоев океана по трубопроводу 6 через полый вал 2 непрерывно поступает в гидропаровую турбину 5 (в данном случае



1 – испарительная камера; 2 – вертикальный полый вал; 3 – гидравлическая турбина; 4 – трубопровод холодной воды; 5 – гидропаровая турбина; 6 – трубопровод теплой воды; 7 – центробежный насос; 8 – электрогенератор; 9 – воздушный насос; 10, 11 – трубопровод удаляемых газов; 12 – реактор; 13, 14 – трубопровод жидкого полимера; 15, 16 – электрокабель.

Рис. 21. Схема энергоустановки с гидропаровой турбиной

турбина выполнена в виде сегнера колеса). В соплах турбины происходит вскипание потока воды и расширение образующегося пара до конечного противодействия. Пар, расширяясь, сообщает ускорение пароводяной смеси. Возникающая в соплах Лавали реактивная сила приводит во вращение вал 2, в результате чего обеспечивает работу насоса 7 и электрогенератора 8, где механическая энергия преобразуется в электрическую.

Холодная вода по трубопроводу 4 через гидравлическую турбину 3 поступает в камеру 1, верхняя часть которой является конденсатором. После конденсации пара образующийся конденсат вместе с потоками холодной и теплой воды удаляют из камеры 1 насосом 7. Вакуумирование камеры 1 производят насосом 9, откачивающим через трубопровод 10 неконденсирующиеся газы (в основном выделяющийся из воды углекислый газ с парами воды). Далее газы по трубопроводу 11 направляют в реактор 12. В реакторе углекислый газ взаимодействует с сопровождающим его водяным паром, в результате чего синтезируют углеводороды. Здесь же в реакторе 12 углеводороды полимеризуют и через трубопроводы 13 и 14 направляют в потоки теплой и холодной воды. Полимеры растворяются и снижают турбулентность воды, чем достигают уменьшения сопротивления трубопроводов и каналов турбин и насоса течению водных потоков.

Для приведения установки в рабочее состояние крайне важно предварительно откачать теплую воду из трубопровода холодной воды. Поэтому запуск системы в действие производят от внешнего достаточно мощного источника энергии. При этом электрогенератор 8 используют в качестве электродвигателя.

Как известно, холодная вода имеет плотность более высокую, чем теплая. В стационарных условиях уровень холодной воды в трубопроводе 4 оказывается примерно на 1 м ниже поверхности океана.

Так как в камере 1 постоянно поддерживается вакуум, то поступление в нее потоков теплой и холодной воды происходит самотеком.

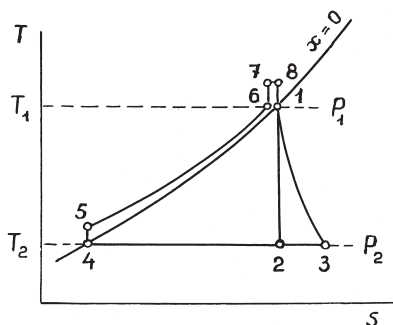
При этом учитывалось, что размещение центробежного насоса на одном валу с тепловой и гидравлической турбинами приводит к тому, что с погружением станции расход энергии центробежным насосом 7 возрастает незначительно, поскольку увеличивающаяся потенциальная энергия теплой и холодной воды целиком используется турбинами 3 и 5 для выработки механической энергии, отдаваемой насосу и электрогенератору. Погружение станции на некоторую глубину дает возможность избежать неприятностей, связанных с воздействием ураганов, тайфунов и цунами на ее конструкцию.

Вертикальное положение трубопровода холодной воды достигается значительным утяжелением его нижней части.

Реакция струи воды, удаляемой из камеры 1 насосом 7, позволяет станции плыть в нужном направлении, обеспечивая тем самым “сбор” энергии в определенном районе океана.

Предложенная установка проста в изготовлении, имеет малую металлоемкость и, что самое главное, позволяет полезно использовать существенно больший теплоперепад по сравнению с паровыми турбинами.

На рис. 22 изображен цикл, реализуемый предлагаемой установкой.



12 – процесс в расширяющейся части сопла Лавая для идеального цикла, т.е. без потерь энергии на трение (13 – изоэнтропийный процесс дросселирования потока); 24 – конденсация пара; 45 – повышение давления откачивающим центробежным насосом (сопровождается незначительным повышением температуры); 56 – нагревание жидкости солнечной радиацией; 67 – нарастание давления в горизонтальных каналах турбины за счет центробежной силы; 81 – процесс в сходящейся части сопла Лавая.

Рис. 22. Цикл энергетической установки с гидропаровой турбиной в системе координат $T-S$

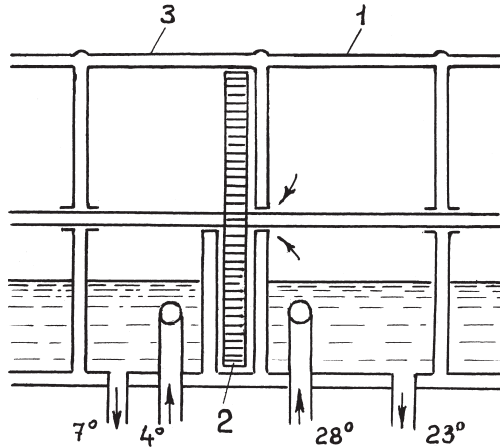
Для сравнения выбрана установка Клода с паровой турбиной (рис. 23), ее цикл представлен на рис. 24.

Предположим, что обе электроустановки работают в равных условиях. Теплая вода поступает на станции с температурой $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, а холодная — с температурой $4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Водяной пар, образующийся при вскипании теплой воды в гидропаровой турбине, конденсируют затем при температуре $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, вводя в контакт с холодной водой. Отсюда полезный температурный напор, используемый гидропаровой турбиной, составляет $21\text{ }^{\circ}\text{C}$.

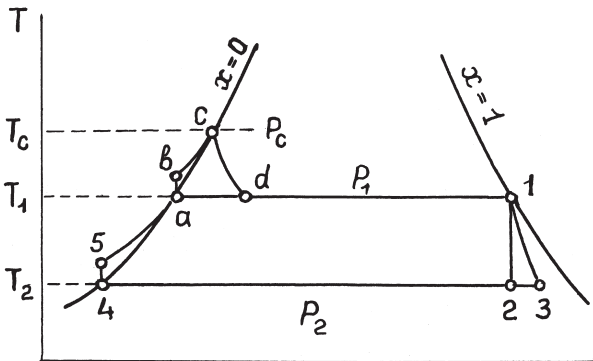
Процесс в известной установке отличается тем, что водяной пар предварительно получают в специальном испарителе, а лишь затем отправляют в паровую турбину. При вскипании теплой воды в испарителе ее температура снижается с $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. После турбины пар подвергают конденсации. Температура конденсации находится также на уровне $7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выполним предварительную оценку эффективности предлагаемой и известной энергоустановок.



1 – испаритель; 2 – турбина; 3 – конденсатор.

Рис. 23. Энергетическая установка с паровой турбиной



12 – процесс расширения пара в идеальном цикле (13 – изохорный процесс дросселирования потока); 24 – конденсация пара; 45 – повышение давления (при незначительном повышении температуры) насосом, откачивающим воду из конденсатора; 5а – нагревание воды, удаляемой из конденсатора, солнечной радиацией; аb – повышение давления (при незначительном повышении температуры) насосом, откачивающим воду из испарителя; bc – нагревание воды, удаляемой из испарителя, солнечной радиацией; cd – изохорный процесс вскипания воды в испарителе.

Рис. 24. Цикл энергетической установки с паровой турбиной в системе координат T–S

4.2.1. Расчет эффективности процесса получения электроэнергии в первом приближении

Как известно, КПД энергетических установок определяют по зависимости [26]

$$\eta = \eta_{\text{и.}} \cdot \eta_{\text{м.з.}} \cdot \eta_{\text{к.}}$$

где $\eta_{\text{и.}}$ — КПД идеального цикла;

$$\eta_{\text{и.}} = \eta_{\text{т.}} \cdot \eta_{\text{о.е.}}$$

$\eta_{\text{м.з.}}$ — КПД, учитывающий различные виды потерь в машинном зале;

$\eta_{\text{к.}}$ — КПД котельной установки или испарителя.

Очевидно, что приведенное выражение допускает учет потерь на любой стадии рабочего процесса установки путем простого умножения правой части равенства на термический КПД, внутренний относительный КПД, механический КПД и т.д.

Термический КПД идеального треугольного цикла равен (рис. 22)

$$\eta'_{\text{т.}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} = 0,036.$$

Внутренний относительный КПД гидропаровой турбины примем на уровне [71]

$$\eta'_{\text{о.е.}} = 0,65.$$

В идеальных условиях потери в машинной сфере энергоустановки не будут превышать 5 %. Следовательно:

$$\eta'_{\text{м.з.}} = 0,95.$$

Поскольку испаритель, генерирующий водяной пар, в предлагаемой установке отсутствует, то это означает, что

$$\eta'_{\text{к.}} = 1.$$

Перемножая полученные значения частных КПД, находим величину общего КПД установки с гидропаровой турбиной

$$\eta' = 2,22 \text{ \%}.$$

В такой же последовательности рассчитываем КПД установки Клода (рис. 24)

$$\eta''_{\text{т.}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 0,054.$$

Внутренний КПД одноступенчатой паровой турбины мощностью $N \approx 100$ МВт равен [31]

$$\eta''_{o.e} = 0,865.$$

КПД $\eta''_{м.з.}$ оставляем на том же уровне, что и в предыдущем случае.

КПД использования тепла испарителем при вскипании поверхностной воды в процессе cd (рис. 24) оцениваем по зависимости

$$\eta''_k = \frac{c'_c \cdot t_c - c'_a \cdot t_a}{c'_c \cdot t_c - c'_4 \cdot t_4}.$$

Поскольку теплоемкость воды при малых температурных перепадах изменяется слабо, то с незначительной погрешностью мы можем рассчитать КПД испарителя по формуле

$$\eta''_k = \frac{t_c - t_a}{t_c - t_4} = 0,238.$$

Зная величины частных КПД, после несложных вычислений находим значение общего КПД известной установки

$$\eta'' = 1,06 \ %.$$

Отношение значений общих КПД сравниваемых энергоустановок имеет величину

$$z = \frac{\eta'}{\eta''} = 2,1.$$

Таким образом, эффективность разработанной нами установки более чем в 2 раза превышает эффективность установки Клода. В этом нет ничего удивительного, так как большая часть тепла, поступающего с поверхностной водой в испаритель известной установки, отправляется неиспользованной вновь в океан.

В дальнейшем попытаемся, повышая точность расчетов и вводя в них затраты энергии на эксплуатацию вспомогательного оборудования, подтвердить предварительный вывод.

4.2.2. Расчет эффективности процесса получения электроэнергии во втором приближении

Вначале займемся энергоустановкой с гидропаровой турбиной.

По уже знакомой нам методике, используя данные по теплофизическим свойствам воды и водяного пара [72], определяем термический КПД цикла η' .

Для этого находим энтропию парожидкостной смеси после адиабатного расширения в процессе 12 (рис. 22)

$$S_2 = S'_1 = 0,4088 \text{ кДж}/(\text{кг} \times \text{К}).$$

Энтропия сухого пара при давлении $P_2 = 1,0012 \times 10^3 \text{ Па}$ и $t_4 = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ равна

$$S''_2 = 8,9751 \text{ кДж}/(\text{кг} \times \text{К}).$$

Паросодержание смеси после адиабатного расширения

$$x_2 = \frac{S_2 - S'_2}{S''_2 - S'_2} = 0,0341.$$

Энтальпия парожидкостного потока

$$i_2 = i'_2 + r_2 \times x_2 = 114,079 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Теплоперепад, используемый турбиной

$$h' = i'_1 - i_2 = 3,2 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Располагаемый теплоперепад

$$\Delta i = i'_1 - i'_4 = 87,866 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Термический КПД цикла с гидропаровой турбиной

$$\eta'_t = \frac{h'}{\Delta i'} = 0,0364.$$

Анализ предельных циклов подразумевает введение в расчеты максимально возможных относительных КПД турбин, по определению.

Для наивыгоднейшего использования энергии парожидкостной смеси окружная скорость реактивной турбины должна быть равна относительной скорости уходящей струи. В оптимальных условиях относительный эффективный КПД реактивной турбины составит $\eta'_{о.е} = 0,828$ [25]. Следовательно, максимальное количество механической энергии, производимое турбиной с единицы массы теплой воды, будет

$$\eta'_{о.е} \times h' = 2,661 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Рассмотрим затраты энергии отдельными элементами станции.

Известно, что сопротивление каналов установки течению воды поглощает значительную часть располагаемой энергии. Уменьшить эти затраты удается путем добавления в потоки растворимых полимеров. Свойствами снижать коэффициент гидравлического сопротивления в 3–4 раза обладают полиэтиленоксид, полиакриламид, гуарова смола и другие полимеры.

Применение рассматриваемого способа при утилизации малых разностей температур затруднено из-за необходимости непрерывной доставки полимеров с суши на океанскую установку.

Между тем, это затруднение легко устраняется путем использования части вырабатываемой электрической энергии для получения растворимых полимеров непосредственно на самой океанской энергетической установке [67, 73].

Напомним, что в каждом м³ глубинной морской воде при 4 °С растворено 1,5 м³ углекислого газа [44]. При конденсации отработавшего пара глубинная вода нагревается от 4 °С до 7 °С, в результате каждый ее м³ выделяет 0,16 м³ углекислого газа. Этот газ вместе с частью водяного пара непрерывно удаляется из конденсатора вакуумным насосом.

Для ориентировочной оценки эффективности дегазации воды использовалось эмпирическое уравнение, установленное для капельного деаэрата. После определения объема выделившихся газов рассчитывалось количество энергии, потребляемой вакуумным насосом [74, 75].

Размещение на платформе станции реактора для получения углеводородов из углекислого газа и водяного пара с последующей их полимеризацией и добавлением в потоки теплой и холодной воды позволяет снизить сопротивление каналов двигателей, откачивающего насоса, а также трубопроводов течению этих потоков.

Синтез растворимого углеводорода происходит по уравнению [76]



В результате реакции получают этиленоксид, а после полимеризации — полиэтиленоксид.

Количество тепла, необходимое при производстве полимерных добавок, рассчитывалось по приведенной выше формуле. Было установлено, что для образования 1 кг полиэтиленоксида требуется 20 тыс. кДж тепла. Эффект снижения сопротивления каналов течению воды достигается при добавке в нее полиэтиленоксида в количестве 0,0025 %.

Как уже говорилось, размещение гидравлического и теплового двигателей на одном валу с центробежным насосом позволяет эффективно использовать как тепловую, так и потенциальную энергию потоков воды, поступающих в вакуумную систему. Добавка полимеров в потоки и оптимизация расположения элементов станции дают возможность свести к минимуму затраты энергии на перемещение воды.

Расчетные значения расхода энергии отдельными видами оборудования даны в табл. 2.

**Энергетические затраты вспомогательного
оборудования установок**

Наименование величины	Гидропаровая турбина		Паровая турбина	
	кДж/кг	%	кДж/кг	%
Общее количество располагаемой энергии	2,661	100	1,096	100
Удаление теплой воды	0,125	4,72	0,123	11,2
Удаление холодной воды	0,087	3,28	0,203	18,5
Откачивание газов	0,196	7,4	0,051	4,63
Производство полимеров	0,502	18,86	–	–

Суммарные затраты энергии вспомогательным оборудованием установки составляют $Q' = 0,911$ кДж/кг, или 34,26 % от вырабатываемой энергии.

Отсюда экономический КПД станции будет

$$\eta'_{\text{эк}} = \frac{\eta'_{o.e} \cdot h' - Q'}{i'_1 - i'_4} = 1,99 \%$$

Примерно в таком же ключе проводим расчет эффективности установки с паровой турбиной.

Энтальпию парожидкостной смеси при вскипании воды в изоэнтальпийном процессе cd (рис. 24) находим из равенства

$$i_d = i'_c = 117,31 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота испарения воды при давлении $P_1 = 2,863 \times 10^3$ Па и $t_1 = 23$ °C равна

$$r_d = 2446,8 \text{ кДж/кг.}$$

Количество получаемого в испарителе пара x_d определяют из выражения

$$i_d = i'_d + r_d \times x_d.$$

$$x_d = 0,00854.$$

Количество теплой воды, необходимой для получения одного кг сухого пара

$$M = \frac{1}{x_d} = 117,09 \text{ кг.}$$

После испарения пар отделяют от воды, поэтому расчет следует вести для 1 кг сухого пара.

Энтальпия и энтропия сухого пара при температуре $t_1 = 23^\circ\text{C}$ имеют значения $i_1'' = 2543,2$ кДж/кг; $S_1'' = 8,6014$ кДж/(кг · К).

Энтропия влажного пара после адиабатного расширения

$$S_2 = S_1''.$$

Значение x_2 рассчитываем из уравнения

$$x_2 = \frac{S_2 - S_2'}{S_2'' - S_2'} = 0,9578,$$

где S_2'' и S_2' — соответственно энтропия пара и воды при температуре $t = 7^\circ\text{C}$.

Энтальпия влажного пара после расширения будет

$$i_2'' = i_2' + r_2 x_2 = 2290,12 \text{ кДж/кг}.$$

Энергия, которую теоретически можно получить с 1 кг пара

$$h_{\Pi} = i_1'' - i_2'' = 137,9 \text{ кДж/кг}.$$

Энергия, теоретически получаемая с 1 кг теплой воды

$$h_B = \frac{h_{\Pi}}{M} = 1,177 \text{ кДж/кг}.$$

Термический КПД цикла с испарителем и паровой турбиной

$$\eta_t'' = \frac{h_B}{i_c' - i_4'} = 0,0134.$$

Для наивыгоднейшего использования энергии паровой струи окружная скорость лопатки теоретически должна быть равна половине абсолютной скорости вытекающей струи. В этих условиях относительный эффективный КПД активной турбины, углы направляющих лопаток которой равны 15° , равен [25]

$$\eta_{o.e} = 0,932.$$

Следовательно, максимальное количество энергии, полученное с 1 кг теплой воды, будет

$$\eta_{o.e} \times h_b = 1,096 \text{ кДж}.$$

Далее рассчитываем расход энергии вспомогательным оборудованием и вносим его в табл. 2. Суммарные затраты установки на собственные нужды составляют $Q'' = 0,376$ кДж/кг, или 34,35 %.

Отсюда экономический КПД установки Клода будет

$$\eta_{\text{эк}}'' = \frac{\eta_{o.e} \cdot h_b - Q''}{i_c' - i_2'} = 0,82 \text{ \%}.$$

Отношение КПД сравниваемых энергоустановок имеет величину

$$Z = \frac{\eta'_{\text{ЭК}}}{\eta''_{\text{ЭК}}} = 2,42.$$

Таким образом, экономический КПД предлагаемой энергоустановки в 2,4 раза выше КПД известной электростанции.

Тонкий поверхностный слой, обладающий тепловой энергией, не позволяет развить единичную мощность энергетической установки. Станция мощностью 100 МВт является уже довольно значительной. Она обладает следующими размерами: диаметр трубопровода теплой воды — 7,0 м; диаметр гидропаровой турбины — 17 м. Истечение парожидкостной смеси происходит из 6 сопл, диаметр выходного сечения каждого из которых составляет 4,5 м.

Как мы видим, освоение самого мощного источника энергии на Земле целиком зависит от успехов в создании теплового двигателя, работающего на вскипающей жидкости.

В связи с этим имеет смысл познакомиться с исследованиями, посвященными усовершенствованию гидропаровых турбин различного типа.

4.3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИДРОПАРОВЫХ ТУРБИН

В простейших термодинамических моделях парожидкостный поток наделяют свойствами гомогенной среды. Выяснение свойств гомогенного квазиравновесного потока необходимо для оценки реальных неравновесных течений. Система уравнений одномерного потока носит общий характер и никак не ограничена абсолютным значением сухости пара.

Между тем, существует качественное различие между расширением гомогенного потока от нижней и от верхней пограничных кривых. При изэнтропийном расширении двухфазного потока от кривой $x = 1$ происходит испарение жидкости, в то время как аналогичное расширение потока от кривой $x = 0$ приводит к увлажнению пара. В результате степень сухости пара в первом случае возрастает, а во втором — снижается.

Еще более существенные изменения основных закономерностей течения возникают в реальных неравновесных потоках. Поэтому при анализе двухфазных сред различают сравнительно хорошо изученную область маловлажного пара и область высоковлажного пара. Попытаемся расширить наши представления о последней еще сравнительно мало изученной области течения потоков.

Исследование особенностей истечения вскипающего потока в прозрачной модели сопла Лавалья подтвердило наличие метастабильного ядра. Четко выраженное расслоение потока на парожидкостный пристенный слой и сплошную струю перегретой жидкости в его центральной части не позволяет полноценно использовать располагаемую тепловую энергию [27].

При испытании экспериментального стенда нами зафиксировано снижение внутреннего относительного КПД $\eta_{o,e}$ гидропаровой турбины с ростом полезного температурного напора. Как отмечалось, это явление связано с двумя причинами: во-первых, с увеличением скорости течения двухфазного потока жидкость не успевает полностью вскипеть в расширяющейся части сопл Лавалья и, во-вторых, потери в реактивной турбине вызваны ударом парожидкостной струи, выходящей из одного сопла, о корпус другого.

Подбирая геометрические размеры сопл Лавалья, нам удалось при малых скоростях течения достичь значения внутреннего КПД $\eta_{o,e} = 38-42\%$. Попытка снизить влияние метастабильности путем уменьшения диаметра сопл Лавалья не привела к желаемым результатам. В этом случае сопротивление гидропаровой турбины течению потока возрастает настолько, что циркуляция прекращается.

Мощность испытанной нами гидропаровой турбины составляет $N = 3$ кВт. Тот же уровень значения внутреннего КПД, но при более высоких температурных напорах, получен при эксплуатации активной гидропаровой турбины мощностью до $N = 70$ кВт.

Сопловой аппарат активной турбины был выполнен в виде блоков сопл, каналы которых имеют форму двух усеченных пирамид, соединенных участком постоянного сечения прямоугольной формы. Причем сопловой аппарат снабжен парогенерирующими решетками [77, 78].

Намеченное усовершенствование конструкции гидропаровой турбины позволит поднять ее внутренний КПД еще примерно на 20% [71].

Далее должны быть применены технологические приемы повышения внутреннего КПД. В частности, использование на ОЭС растворимых полимеров приведет как к уменьшению турбулентности, так и к снижению метастабильности воды. Дело в том, что длинные молекулы полимеров являются инородным телом в воде и потому их поверхность служит активатором процесса образования паровых пузырьков.

Применение акустических излучателей с частотой в несколько сотен килогерц обеспечивает полный распад центральной струи перегретой жидкости. Последнее обстоятельство позволяет осуществить в единой конструкции разгонного соплового устройства комбинацию треугольного

шение потоков и конденсация основной части паровой фазы. В цилиндрическом канале 4 заканчивается конденсация пара. Выходное сечение Z канала 4 размещено так, что струя 5 под нужным углом попадает на лопатки 6 турбины 7. В этом случае в качестве двигателя используют ковшовые турбины [81].

При устойчивой работе комбинированного сопла в сечении K после камеры смешения 3 образуется капельно-паровая смесь с температурой T_3 . Для того чтобы процесс в аппарате был термодинамически обратимым, охлаждение активного агента в камере смешения следовало бы осуществлять по линии de , отвечающей процессу нагрева пассивного агента. Площадь $eabcd$ соответствует располагаемой энергии, которая может использоваться для увеличения конечного напора образовавшейся смеси (здесь энергией, затрачиваемой питающими насосами на процессы ab и ef , мы пренебрегаем).

Для реализации описанного процесса в камере смешения между сечениями d и k давление должно нарастать от уровня P_2 , соответствующего насыщению при температуре T_2 , до уровня, соответствующего температуре T_3 . Тогда активный агент должен был бы расширяться в сопле 1 до минимального давления в камере смешения, отвечающего температуре T_2 .

В реальных условиях давление в камере смешения остается практически неизменным. Активный агент расширяется по изоэнтропе cd от давления P_1 до давления P_3 , соответствующего температуре насыщения T_3 . Процессу охлаждения активного агента в камере смешения будет соответствовать изобара (изотерма) da . Располагаемая работа сократится на величину $fadef$. Соответственно увеличится количество тепла, сообщаемое пассивному агенту. При неизменной температуре T_3 возрастает масса пассивного агента. В обобщенной диаграмме нагреву увеличенного количества охлаждающей жидкости соответствует линия ik . Приращение энтропии характеризует в данном случае необратимость, связанную с действительными температурными перепадами между смешиваемыми агентами.

Суть конструкторских усовершенствований разгонного сопла должна сводиться к тому, чтобы приблизить величину площади $abcd$, отражающей кинетическую энергию вскипающего парожидкостного потока в сечении d , к значению площади $efkz$, эквивалентной кинетической энергии высокоскоростного капельножидкого потока в сечении Z .

Анализ опытных данных по испытанию отдельных элементов комбинированного сопла показал удовлетворительное согласие с теорией его расчета [27].

Для нас рассматриваемый обобщенный процесс интересен еще и тем, что позволяет составить аналогичную методику расчета природного термокомпрессора, где потоки влажного воздуха, попадая в горные хребты, преобразуют свою кинетическую энергию в потенциальную.

Хотелось бы напомнить, что в разгонном сопле основным видом потерь являются потери от метастабильности. Для увеличения эффективности сопла в нем может быть установлена парогенерирующая решетка, одновременно выполняющая роль акустического излучателя.

Применение разработанного сопла даст возможность повысить значения внутреннего КПД турбины, по-видимому, до уровня $0,7 < \eta_{о.е} < 0,75$.

С учетом этого обстоятельства ожидаемый экономический КПД ОЭС должен находиться в пределах $1,5 < \eta_{эк} < 1,7$ %.

Объем рабочего тела в конце расширения является существенной характеристикой турбин. Вакуумный водяной пар примерно в 3 раза увеличивает габариты гидропаровой турбины в сравнении с используемой в настоящее время на ТЭС паровой турбиной равной мощности. Но если сравнивать затраты металла на единицу вырабатываемой энергии, то следует учитывать и его расход на вспомогательное оборудование. Океаническая станция имеет дегазатор, насос для удаления воды, вакуумный насос и трубопроводы. Вспомогательное оборудование ТЭС включает механизмы для подготовки угля, дробилки, сушилки, котлоагрегаты, рекуператоры, конденсаторы, системы очистки газов и удаления шлака, трубопроводы. Отсюда удельный расход металла на сооружение ТЭС в десятки раз превышает таковой для океанической станции. Кроме того, добыча и перевозка угля также требуют расхода металла.

Шахты, железные дороги, электростанции и их отвалы занимают значительную территорию земли, ее можно было бы использовать для сельскохозяйственных целей. Сгорание топлива на станциях сопровождается выбросом в атмосферу токсичных, канцерогенных и мутагенных веществ. Океанические станции не страдают перечисленными выше недостатками.

На первый взгляд кажется, что станция с КПД < 2 % нерентабельна. Но здесь необходимо отметить, что принятый промышленностью энергетический цикл, использующий в конечном счете энергию Солнца, имеет еще меньший КПД. Так, известно, что первое звено этого цикла — фотосинтезирующие растения — усваивают лишь 1–3 % падающего солнечного света. Аккумулированная ими энергия сосредоточена в месторождении угля и, возможно, нефти и газа. Следующее звено — тепловые двигатели, использующие эти виды топлив с КПД примерно 30 %. В итоге суммарный КПД цикла составляет $\eta = 0,02 \times 0,3 = 0,006$, то есть менее 1 %.

К тому же определяющим фактором при сравнении экономичности ТЭС и ОЭС является стоимость исходного топлива. С учетом данного фактора “чаша весов” явно склоняется в сторону преимуществ ОЭС.

Нам осталось откорректировать результаты предварительных расчетов величины эксплуатируемой зоны океана. Найденные значения $\eta_{\text{эк}}$ дают нам возможность втрое сократить район действия ОЭС.

Здесь следует заметить, что термохалинная циркуляция, скорее всего за считанные месяцы, восстановит охлажденный ОЭС поверхностный слой. Поэтому вряд ли придется отправлять ОЭС в длительные странствия.

4.4. ПРОИЗВОДСТВО ЭНЕРГОЕМКИХ ВЕЩЕСТВ НА ОКЕАНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Итак, электростанции в океане способны дать практически неограниченное количество сравнительно дешевой энергии.

Сразу же появляется соблазн переправить ее в виде традиционных энергоносителей на сушу и использовать в действующих технологических процессах. Однако при этом возникает вопрос: “Насколько правильно мы поступаем, поддерживая жизнь устаревшего парка автомобилей и тепловых электростанций с их непомерно высоким потреблением энергии?”

Например, производя углеводороды на ОЭС и отправляя их на сушу, мы тем самым будем способствовать сохранению ТЭС и транспортных средств, использующих энергию топлива всего лишь с КПД 15–30 %. Причем в этом случае будет продолжаться накопление в окружающей среде токсичных, канцерогенных и мутагенных веществ, не говоря уже о повышении концентрации тепличных газов.

Перейдя, скажем, на использование водорода, ТЭС и автомобили смогут вырабатывать электроэнергию в топливных элементах с КПД 65–70 % и при этом не отравлять атмосферу своими выбросами.

Но решая таким методом проблему производства дешевой электроэнергии, мы приходим к другой крайности, а именно к созданию благоприятных условий для законсервирования в сегодняшнем виде архаичных производств стали, химических и пищевых продуктов.

Так, известно, что 15–25 % машин и оборудования ежегодно выводится из металлофонда Мира, исчисляемого миллиардами тонн, из-за коррозии и поломок, связанных с низкими прочностными свойствами применяемых материалов. На восстановление дееспособности металлофонда затрачиваются значительные средства. Избежать этого можно, если непосредственно на ОЭС организовать производство некорродирующих, высо-

копренных и специальных сплавов, которые затем можно отправлять на суши для изготовления машин, компьютеров, металлоконструкций и т. д.

Точно также не имеет смысла поставлять дешевый водород в сельское хозяйство. Здесь это высококалорийное и экологически чистое топливо будет использовано с ничтожным эффектом для вспахивания земли, посева, внесения удобрений и уборки урожая.

Экономически гораздо выгоднее производить белок и другие продукты на основе водорода на самих ОЭС, минуя стадии выработки, транспортировки и потребления энергоносителей.

К аналогичному выводу можно прийти, анализируя производства различных химических продуктов, таких, как удобрения, каучук, пластмассы, синтетические волокна, краски и т. д.

Отсюда следует, что наиболее энергоемкие и экологически опасные промышленные объекты, а также ряд сельскохозяйственных производств целесообразно разместить непосредственно на платформах плавающих ОЭС.

Но вернемся к проблеме, решение которой сулит качественные изменения в технологиях базовых отраслей промышленности и транспорта. Речь идет о проблеме производства и использования дешевого водорода.

Перечислим области, где сейчас используют водород.

Химическая, нефтеперерабатывающая, угле- и нефтехимическая промышленности:

- синтез аммиака, хлористого водорода, метанола, восстановление углеводов (риформинг), включая промежуточные вещества, необходимые для производства каучука, нейлона, анилина, полиуретана, красителей и мыла;

- получение малых объемов специальных химикалиев, в частности, перекиси водорода для производства перселей и стиральных порошков;

- в процессах гидрокрекинга и гидроочистки светлых нефтепродуктов и масел, регенерации катализаторов;

- получение жидких топлив из угля [82—88].

Микробиологическая промышленность:

- производство белка на основе водородокисляющих бактерий [89].

Пищевая промышленность:

- гидрирование овощей, животных жиров и сала для застывания. Маргарин является главным продуктом. Потребление водорода зависит от ценности йода в маслах, подлежащих гидрированию; рыбий жир (например, жир анчоуса) имеет более высокое содержание йода, чем овощной жир (масло) — следовательно, он требует больше водорода.

Металлургия и машиностроение:

— использование в качестве восстановительной атмосферы в производстве стали и металлообработке, особенно в процессе светлого отжига нержавеющей стали и спекания металлических порошков;

— в производстве высокочистого кремния для изготовления микроконтактов в электронной промышленности;

— в процессах изготовления ламп накаливания, радиоламп и кинескопов;

— при проведении водородной и водород-кислородной резки и сварки металлов, напылении антикоррозионных покрытий;

— в производстве флотуемого стекла [88, 90–92].

Энергетика и транспорт:

— извлечение и переработка урана, получение сверхперегретого пара при сжигании водорода в кислороде, охлаждение обмоток роторов и статоров в электрогенераторах;

— применение в качестве основного топлива транспортных двигателей и в качестве иницилирующей добавки к углеводородным топливам [88, 93–97].

Космонавтика, авиация, водо- и воздухоплавание, метеослужба:

— топливо для ракетных и авиационных двигателей; реагент в химических источниках тока; газ для заполнения дирижаблей, радиозондовых и шаропилотных оболочек; газ для морских подъемных устройств [88, 95, 98–103].

Как видим, уникальные свойства водорода делают его незаменимым реагентом в большинстве химических и металлургических процессов, позволяют использовать в качестве высококалорийного и экологически чистого топлива, а также выдвигают на первое место при выборе газа для водо- и воздухоплавающих средств.

Разумеется, снижение стоимости водорода приведет как к расширению областей применения, так и к увеличению объемов его потребления.

Обсудим варианты использования энергии ОЭС с учетом необходимости производства водорода. Ранее предлагалось применять электроэнергию, вырабатываемую океаническими станциями, для получения химических продуктов, топлив (водорода), окисления и восстановления органических веществ, для получения золота, йода и т. д. из морской воды, и особенно для связывания азота [104]. Предлагалось также аккумулированную солнечную энергию использовать для сжижения воздуха. Жидкий воздух можно затем испарять за счет тепла окружающей среды и применять в воздушных двигателях [105]. Экономические расчеты проведены для двух производств: газообразного (или жидкого) водорода и азота [106]. Общим для них являются: генерация электроэнергии, обессоливание воды

и производство водорода. При этом стоимость силовых устройств, электрогенераторов, опреснителей и электролизеров была принята по данным фирм, изготавливающих эти виды оборудования.

В случае производства жидкого водорода учитывалась стоимость установки для его сжижения, а при получении аммиака — оборудования по разделению воздуха и реакторов, где азот воздуха взаимодействует с водородом.

В расчетах ориентировались на две станции мощностью 100 и 500 МВт, расположенные на расстоянии от 185,2 км до 1852 км до берега.

Была подсчитана стоимость транспортировки водорода и жидкого аммиака по трубопроводам, проходящим под водой на глубине примерно 456 метров и, по второму варианту, океанскими баржами. В последнем случае принимались во внимание затраты на оборудование причалов.

Стоимость энергии, доставляемой с океанической станции, оказалась незначительно выше стоимости синтетических топлив, получаемых из угля. Так, стоимость метилового спирта из угля составила 6,0—7,5 долларов за МВт·ч, в то время как стоимость жидкого водорода оказалась равной 10—15 долларов за МВт·ч. Цены же на аммиак, поставляемый на берег, определились в пределах 270—277 долларов за тонну. Для сравнения: стоимость аммиака, получаемого на основе водорода из метана, составила в 1975 году 190—200 долларов за тонну. В расчетах принята стоимость энергии, вырабатываемой паровыми турбинами. Если же учесть, что гидропаровые турбины дают в 1,5—2 раза более дешевую электроэнергию, то цены продуктов, вырабатываемых на суше и в океане, становятся одинаковыми.

Ориентация на доставку водорода на сушу не совсем оправдана. Главным недостатком водорода в этом случае является низкая плотность. Газообразный водород имеет вес всего 0,089 кг в кубическом метре. Сейчас водород перевозят в баллонах при давлении 150 атмосфер. Вес каждого баллона — 85 кг, а вес водорода в нем — всего 0,5 кг. При таких весовых соотношениях нецелесообразно перевозить газообразный водород в танкерах.

Жидкий водород при 20° Кельвина имеет плотность 71,3 кг/м³, что также требует для его перевозки танкеров значительного объема. Кроме того, на плавающих станциях необходимо разместить специальные установки для сжижения водорода, а на танкерах — термостатирующие устройства, поддерживающие температуру водорода 20°К. Известно также, что операции с жидким водородом крайне опасны в пожарном отношении.

Перечисленные трудности удастся преодолеть, если получаемую на термогидростанциях электроэнергию использовать для восстановления окислов некоторых веществ. Затем эти вещества следует отправлять обыч-

ными танкерами на материк, где в специальных реакторных установках при взаимодействии с водой получать водород и окислы. Водород можно далее использовать как топливо для различных энергетических установок. С этой целью можно применять, например, литий, бор, магний, алюминий, кальций, кремний и другие вещества [93]. Целесообразность предложенного способа транспортировки энергии на материк подтверждается на примере рассмотрения реакции взаимодействия алюминия с водой



Весовые количества участвующих в реакции веществ таковы, что для получения 1 кг водорода требуется 9 кг алюминия, и при этом реакция сопровождается выделением тепла в количестве $Q_p = 15155$ кДж на каждый килограмм алюминия. Это тепло также может быть полезно утилизировано.

Если учесть, что 1 кг жидкого водорода занимает объем 14×10^{-3} м³, а 9 кг алюминия — $3,1 \times 10^{-3}$ м³, то танкер, перевозящий алюминий, способен доставить на берег в десять раз больше энергии, чем в случае транспорта им жидкого водорода. При замене угля, нефти и газа на водород понадобится несколько сотен миллионов тонн алюминия для транспорта энергии с ОЭС на сушу. Трудности в производстве такого количества алюминия заключаются в том, что высококачественные запасы бокситов на Земле сравнительно ограничены. Поэтому далее обсуждается более реальный вариант получения энергоаккумулирующих веществ на основе низкокалорийных углей.

Запасы этих так называемых низкокалорийных или высокозольных углей составляют сотни миллиардов тонн. Содержание углерода в них находится на уровне 30–60 %, остальное приходится на неорганическую часть, состоящую в основном из оксидов алюминия, кремния и железа.

Как известно, энергетике необходим уголь с минимальным содержанием неорганических соединений (менее 10 %).

Кокс, выпускаемый из угля для металлургии, тем более не допускает каких-либо оксидных включений.

Таким образом, колоссальные запасы низкокалорийного угля оказались невостребованными.

Между тем, оптимальное сочетание углерода и оксидов придает низкокалорийному углю наиболее ценные свойства сырья для производства необходимых нам сплавов и легирующих элементов.

Для получения 1 т сплава ферросиликоалюминия (ФСА) требуется в среднем 3 т высокозольного угля и 12 МВт электроэнергии.

При взаимодействии углерода с оксидами алюминия, кремния и железа в руднотермических печах образуется значительное количество газооб-

разного оксида углерода, что делает возможным выработку 0,6 т метанола на каждую тонну выпускаемого сплава.

Примеси, имеющиеся в угле, частично переходят в сплав, что сказывается на его активности.

Высокую реакционную способность при взаимодействии с водой с выделением водорода обнаружил сплав [107] при следующем соотношении компонентов, мас. %: железо 5,0–15,0; алюминий 3,0–20,0; кальций 0,1–1,0; натрий 0,01–1,00; медь 0,1–3,0; кремний — остальное; а также сплав [108]: железо 5,0–15,0; алюминий 3,0–20,0; кальций 0,1–1,5; бор 0,01–3,2; калий 0,01–1,0; кремний — остальное.

Перед использованием в водородных реакторах сплавы предварительно закаляют при 1600–1750 °С или проводят сверхбыструю закалку с целью получения аморфной структуры [109–111].

В последнее время проведен анализ углеотходов отечественных обогатительных фабрик с целью использования их в качестве шихты для выплавки сплава ФСА [112].

Одновременно с усовершенствованием состава сплава и расширением сырьевой базы для его производства создан и испытан ряд транспортных и стационарных водородных реакторных установок [113–116].

Кроме энергетики, транспорта и угольной промышленности, развертывание широкомасштабного производства сплава ФСА на ОЭС затронет интересы и металлургии. Дело в том, что этот сплав уже сейчас используют в значительных объемах для раскисления, модификации и легирования сталей [117, 118]. В перспективе ФСА займет место дефицитного кокса.

На данный момент нами разрабатывается технология производства алюминия путем центрифугирования сплава ФСА. Эти работы позволят обеспечить машиностроение дешевым конструкционным алюминием, а также некорродирующими литейными сплавами силикоалюминия.

Ранее мы сделали заключение о том, что на ОЭС нет особой необходимости производить в значительных масштабах нынешние энергоносители. Но синтез углеводов в океане целесообразен, когда речь идет о получении продуктов питания. Для этого достаточно разместить на платформе станции установку непрерывного культивирования водородных бактерий. Как известно [119, 120], водородокисляющие бактерии способны синтезировать биомассу, богатую белком, витаминами, а также другие продукты из простой газовой среды за счет энергии окисления водорода. Питающая бактерии газовая смесь содержит 50–60% H_2 , 20–30% O_2 , 2–5% CO_2 . Первые два элемента можно получить электролизом воды, углекислый газ — дегазацией глубинной воды. Бактерии выращиваются в

питательной минеральной среде, содержащей азот, фосфор, серу, калий, магний и другие вещества. Большинство из них имеется в морской воде или может быть получено из воздуха.

Удельная калорийность биомассы водородных бактерий в среднем составляет 22175 кДж/кг, при этом коэффициент использования энергии окисления водорода достигает 24,5 %. При оптимальных условиях выращивания водородные бактерии выделяют в среду в значительных количествах лишь продукт окисления водорода — воду.

В 0,1 кг белка водородных бактерий содержится полный суточный рацион незаменимых аминокислот для человека. На биосинтез 1 кг сухой биомассы расходуется 40—50 кВт·ч электроэнергии. Термогидростанция мощностью 100 МВт может производить в час 2000 т сухой биомассы.

Итак, недалеко то время, когда флотилии танкеров, груженные низкокалорийным углем, будут направляться на ОЭС и через некоторое время возвращаться заполненными ценнейшими металлургическими и химическими продуктами, которые могут быть также использованы как энергоносители.

Часть танкеров будет привозить нам белок и различные морепродукты.

Низкая стоимость электроэнергии, вырабатываемой ОЭС, приведет к смещению промышленности и сельского хозяйства в просторы океана.

ВЫВОДЫ

Выполненные термодинамические расчеты показали, что при определенных условиях океан и атмосфера в состоянии в течение 3 млн лет изменить скорость вращения Земли вокруг своей оси на 30–40 оборотов в год.

Для исключения колебаний скорости вращения Земли производство электроэнергии на основе тепла океана следует осуществлять в узкой зоне, прилегающей к экватору.

С площади экваториального пояса океана размером в 5 млн км² можно получить примерно в 3 раза больше энергии, чем производят ее сейчас все электростанции мира.

Наиболее перспективным двигателем, способным эффективно использовать малые разности температур между слоями воды в океане, является турбина, работающая на вскипающей воде.

На океанических станциях целесообразно разместить энергоемкие производства сплавов, белка и химических продуктов. Сырьем для выплавки сплавов может служить низкокалорийный уголь, завозимый на ОЭС танкерами.

Производимые на ОЭС сплавы имеют многоцелевое назначение. Они служат в качестве раскислителей сталей, сырьем для производства алюминия, а также активным реагентом при производстве водорода из воды.

Массовое производство дешевого водорода способно качественно изменить технологии производства промышленных и сельскохозяйственных продуктов, а также улучшить показатели транспортных средств.

ПОСЛЕСЛОВИЕ К ПЕРВОЙ ЧАСТИ КНИГИ

В этом разделе принято подводить итоги рассмотрению затронутых в книге проблем. Но поскольку краткие выводы даны после каждой главы, то не имеет смысла останавливаться на них вновь.

Кажется более целесообразным обсудить здесь мероприятия, которые необходимо провести для решения проблемы освоения возобновляемых источников энергии.

Из предоставленного в данной книге материала видно, насколько многогранна поставленная задача. Но по своему экономическому значению обладание неограниченными запасами природной энергии не менее важно, чем, например, освоение космоса или глубин океана.

Влияние предлагаемого способа на климат Земли будет обнаружено сразу же после того, как в плавание отправится первая флотилия ОЭС.

Из законов термодинамики следует, что климатические циклы на Земле носят необратимый характер и раз начавшееся потепление или похолодание невозможно остановить. Этот факт нужно принимать как должное, а размещение новых городов и промышленных объектов производить с учетом ожидаемых изменений в природе.

Посмотрим, насколько опасно намечающееся потепление на Земле.

Как известно, более 71 % поверхности земного шара занимает Мировой океан. Если вычтуть из оставшейся части районы, занимаемые ледниками, пустынями, горами, болотами и тундрой с ее вечной мерзлотой, где жизнь практически невозможна, то оказывается, что человечество ютится на 10 % поверхности Земли. Отсюда возникают серьезные конфликты из-за клочков Земли, к тому же, как правило, непригодных для нормальной жизни.

Но в истории Земли были периоды, когда температура поверхностных слоев Мирового океана была примерно одинаковой на экваторе и в приполярных областях. В этот тропический период биосфера распространила свои владения до Северного и Южного полюсов.

Подсчитано, что таяние ледников Антарктиды и Гренландии повысит уровень Мирового океана на 60 м, что приведет к затоплению части низменных территорий Земли. Да, это действительно произойдет. Но одновременное улучшение циркуляции вод в Мировом океане даст человечеству бескрайние просторы Антарктиды и Гренландии, сделает пригодной для жизни Сибирь, Аляску и Север Канады. Наконец, обладание мощными природными источниками энергии даст возможность покрыть Сахару сетью каналов с циркулируемыми потоками воды и превратить ее в цветущий

сад. Плавающие города также позволят решить часть территориальных проблем.

Откроется перспектива использования биологических ресурсов в обширных районах приполярья.

Возможно, деятельность ООН следует переместить с улаживания хронических территориальных конфликтов на решение проблемы рационального использования материков?

Поэтому необходимо активизировать сотрудничество заинтересованных стран в создании океанических электростанций.

В свое время исследовательская группа, возглавляемая автором, приостановила разработку конкретных ОЭС. Причина была одна — стоимость защиты плавающей ОЭС от нападения извне оказалась соизмеримой со стоимостью самой станции. Но в свете многочисленных человеческих жертв и материальных затрат на ликвидацию последствий недавних катастроф, связанных со взрывом реактора атомной станции и разрушением небоскребов, расходы на защиту ОЭС уже не кажутся слишком высокими.

Строительство ОЭС позволит ликвидировать конфликты, возникающие из-за источников энергии.

Видимо, назрела необходимость тесной увязки усилий, предпринимаемых энергетиками, с исследованиями метеорологов и океанологов. Нужно не упустить шанс по регулированию климата на Земле с помощью плавающих ОЭС.

Автор приглашает читателей принять участие в дискуссии по затронутым в книге проблемам. Вторая часть монографии “Термодинамика литосферы. Геотермические электростанции” выйдет в свет с интервалом примерно в полгода. Это дает возможность поместить в приложении к ней наиболее интересные отзывы о первой части книги. Надо сказать, что первый этап дискуссии состоялся вслед за опубликованием в печати сведений о способе извлечения природной энергии [68, 69, 121–125]. Самым поразительным оказалось то, что специалисты, участвующие в дискуссии, не смогли отличить термический КПД турбины η_t от внутреннего КПД η_{oe} [126, 127]. Само собой разумеется, что аналогичные отзывы, по своей сути противоречащие законам физики, не будут включены в состав приложения второй части книги.

Здесь необходимо еще раз напомнить предполагаемым участникам дискуссии, что изложенный в монографии материал является всего лишь теорией, отражающей наиболее вероятный механизм наблюдаемых земных процессов. Только комплексные исследования активных зон атмосферы

ры и океана в сочетании с измерениями скорости вращения Земли могут подтвердить или опровергнуть выдвигаемую теорию.

В связи с этим автор надеется, что специалисты, желающие принять участие в дискуссии, предложат свои экспериментально обоснованные модели природных явлений.

Вслед за второй частью данной монографии автор предполагает издать книгу “Аккумулируемая энергия” в 2-х частях. Часть 1 — “Термодинамика биосферы”. Часть 2 — “Электрохимические и высокотемпературные электростанции”.

В приложении этой книги будут помещены отзывы читателей о второй части монографии “Возобновляемая энергия”.

Одновременно автор оставляет за собой право ответить наиболее активным критикам выдвинутой им теории.

К слову, использование методов термодинамики для расчета промышленных и природных процессов находится на крайне низком уровне.

Так, несмотря на то, что с момента опубликования автором термодинамической теории естественной циркуляции потоков прошел значительный период времени [95], в большинстве высших учебных заведений, в том числе и в НТУ “ХПИ”, продолжается изучение ошибочного гидродинамического метода расчета циркуляционных контуров парогенераторов и испарителей.

В пределах изученной литературы по метеорологии и океанологии автор также не обнаружил сколько-нибудь серьезных термодинамических расчетов. Из отечественных ученых ближе всего к пониманию термодинамических основ природных процессов подошел океанолог В. Шулейкин.

Отсюда напрашивается вывод о том, что в учебные программы вузов должен быть введен курс по термодинамическим методам анализа природных и промышленных процессов. Возможно, повышение уровня знаний в столь абстрактной и трудноусваиваемой дисциплине, как термодинамика, позволит ученым и инженерам склонить общественное мнение в пользу необходимости решения стоящей перед нами проблемы. В этом случае, очевидно, будет проще убедить потенциальных инвесторов вложить средства в разработку конкретных проектов океанических электростанций. Именно это обстоятельство послужило причиной составления автором данного пособия к учебному курсу.

Данная книга одновременно издана на английском языке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дж. В. Гиббс. Термодинамические работы. — М.; Л.: Госиздат технико-теорет. лит., 1950. — 492 с.
2. Ландау Л.Д. Собрание трудов в 2-х т. / Под ред. Е.М. Лившица. — М.: Наука, 1969. — Т. 1. — 512 с.
3. Проблемы современной космологии / Под ред. В.А. Амбарцумяна. — М.: Наука, 1972. — 472 с.
4. Хокинг С. От большого взрыва до черных дыр. — М.: Мир, 1990. — 168 с.
5. Пороло Л.В. Воздушно-газовые подъемники жидкости (эргазлифты). Основы теории и методы расчета. — М.: Машиностроение, 1969. — 160 с.
6. А. с. 324028 (СССР). Способ упаривания раствора / Б.А. Трошенькин, А.В. Герасименко, П.Г. Лучин. — Оpubл. в Б.И., 1972, № 2.
7. Ястржембский А.С. Техническая термодинамика. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. — 495 с.
8. Стырикович М.А., Мартынова О.И., Миропольский З.Л. Процессы генерации пара на электростанциях. — М.: Энергия, 1969. — 312 с.
9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Машиностроение, 1975. — 559 с.
10. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. — М.: Мир, 1972. — 440 с.
11. Исследование турбулентных течений двухфазных сред / Под ред. Кутателадзе. — Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1973. — 315 с.
12. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. — М.: Наука, 1974. — 512 с.
13. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. — М.: Наука, 1983. — 416 с.
14. Гельперин И.И., Ильинский А.А., Алмазов О.А. и др. Жидкий водород. — М.: Химия, 1980. — 228 с.
15. Свойства конденсированных фаз водорода и кислорода. — Киев: Наук. думка, 1984. — 240 с.
16. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. — М.: Наука, 1978. — Т. 1, книга 1. — 496 с., Т. 1, книга 2. — 328 с.
17. Свойства жидкого и твердого водорода. — М.: Изд. Стандартов, 1969. — 136 с.
18. Бронштэн В.А. Гипотезы о звездах и Вселенной. — М.: Наука, 1974. — 384 с.
19. Шулейкин В.В. Физика моря. — М.: Изд. АН СССР, 1953. — 990 с.

20. Лакомб А. Физическая океанография. — М.: Мир, 1974. — 496 с.
21. Взаимодействие океана с окружающей средой / Под ред. А.И. Дуванина. — М.: Изд. Моск. универ., 1982. — 214 с.
22. Лакомб А. Энергия моря. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 128 с.
23. Хунджау Г.Г., Андреев Е.Г., Скорохватов Н.А. Натурные наблюдения радиационной температуры и эффективного излучения поверхности моря // Тез. докл. Седьмой пленум рабочей группы по оптике океана Комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана. “Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов”, октябрь 1980 г. — Таллин, 1980. — С. 205–208.
24. Формирование, структура и флуктуации верхнего термоклина в океане. — Л.: Гидрометеиздат, 1971. — 144 с.
25. Шюле В. Техническая термодинамика. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1934. Т. 1. Кн. 2— 262 с.
26. Зысин В.А. Комбинированные парогазовые установки и циклы. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1962. — 186 с.
27. Вскипающие адиабатные потоки / Под ред. В.А. Зысина. — М.: Атомиздат, 1976. — 152 с.
28. А. с. 401369 (СССР). Выпарной аппарат / П.Г. Лучин, Б.А. Трошенин. — Опубл. в Б.И., 1973, № 41.
29. Дрындрожек Э.И. Критическая скорость двухфазного потока. — В кн. Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства веществ. — М.: Наука, 1968. — С. 87–100.
30. Зысин В.А., Барилевич В.А. Экспериментальное исследование гидророторной турбины // Энергомашиностроение, 1973. — 1. — С. 4–6.
31. Лосев С.М. Паровые турбины. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1954. — 368 с.
32. Айзенштейн М.Д. Центробежные насосы для нефтяной промышленности. — М.: Гостоптехиздат, 1957. — 364 с.
33. Барановский Н.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. — М.: Машиностроение, 1973. — 160 с.
34. Гидродинамика межфазных поверхностей: Сб. статей 1979–1981 гг., пер. с англ. / Сост. Ю.А. Бувич, Л.М. Рабинович. — М.: Мир, 1984. — 210 с.
35. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен. — М.: Мир, 1983. — 400 с.
36. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1970. — 260 с.

37. Витвицкий Г.Н. Циркуляция атмосферы в тропиках. — Л.: Гидрометеоздат, 1971. — 144 с.
38. Перри А.Х., Уокер Дж. М. Система океан—атмосфера. — Л.: Гидрометеоздат, 1979. — 196 с.
39. Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. Элементы струйной автоматики. — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.
40. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 352 с.
41. А. с. 760537 (СССР). Установка для получения водорода / А.Н. Подгорный, И.Л. Варшавский, Б.А. Трошенькин и др. — Оpubл. в Б.И., 1981, № 33.
42. Паровозы / Под ред. С. П. Сыромятникова и А. А. Чиркова. — М.: Трансжелдориздат, 1949. — 692 с.
43. Трошенькин Б.А., Гальцов В.Я. Концентрирование латекса в восходящем потоке // Хим. и нефт. машиностроение, 1966. — № 8. — С. 26–27.
44. Смирнов Г.Н. Океанология. — М.: Высш. школа, 1974. — 344 с.
45. Barbara McKee. Solutions for the 21st. Century. Zero Emissions Technologies for Fossil Fuels. Technology Status Report. — USA International Energy Agency, 2002. — 48 p.
46. Тарлинг Д., Тарлинг М. Движущиеся материки. — М.: Мир, 1973. — 104 с.
47. Ясаманов Н.А. Древние климаты Земли. — Л.: Гидрометеоздат, 1985. — 296 с.
48. Назаров Г.Н. Оледенение и геологическое развитие Земли. — М.: Недра, 1971. — 152 с.
49. Зимы нашей планеты / Под ред. Б. Джона. — М.: Недра, 1982. — 336 с.
50. Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. — М.: Мир, 1964. — 384 с.
51. Киселев В.М. Неравномерность суточного вращения Земли. — Новосибирск: Наука СО, 1980. — 160 с.
52. Тугаринов А.И. Общая геохимия. — М.: Атомиздат, 1973. — 288 с.
53. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. — М.: Наука, 1988. — 432 с.
54. Более чем достаточно? — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 216 с.
55. Гуревич Б.З. Энергия невидимого света. — М.: Наука, 1973. — 144 с.
56. Капица П.Л. Эксперимент, теория, практика. — М.: Наука, 1981. — 496 с.

57. История техники. М., Л.: Гл. ред. общетехнической лит. и монографии. ОНТИ НКТП СССР, 1935. — Вып. 3. — 249 с.
58. W.D. Mets. Ocean temperature gradients; solar power from the sea // Solience. — 1973. — Vol. 180. — P. 1266–1267.
59. Риффо К. Будущее — океан. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 272 с.
60. L.L. Booda. An ocean based solar-to-hydrogen energy conversion concept // Sea Technol., 1974. — 15. — 2. — P. 21–24.
61. Mitsui T., Ito F., Seya Y., Nakamoto Y. Outline of the 100 km OTEC pilot plant in the Republic of Nauru // JEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983. — Vol. Pas. — 102. — № 9. — P. 3167–3171.
62. Weymueller Carl R. Oceans of energy — power from warm water // Weld. Des and Fabr., 1982. — 55. — № 4. — P. 92–94.
63. Floating power stations // Engineering, 1982. — 222. — № 5. — 357.
64. Вершинский Н.В. Энергия океана. — М.: Наука, 1986. — 152 с.
65. Lenmard D.E. OTEC developments out of Europe // EET Rerour: Technol. Assess. Conf., Honolulu, Haw., Jan. 22–26, 1989: Proc. — Honolulu (Haw), 1989. — P. 6/2–6/12.
66. Докукин И.П. Термодинамический анализ и оптимизация электростанций, использующих разность температур морской воды для получения электроэнергии // Теплоэнергетика, 1992. — 10. — С. 68–75.
67. А. с. 730992 (СССР). Способ использования разности температур воды в океане/ А.Н. Подгорный, И.Л. Варшавский, Б.А. Трошенькин. — Опубл. в Б.И., 1980. № 16.
68. Трошенькин Б.О. Використання тепла океану для одержання водню // Вісник Академії наук Української РСР, 1979. — 10. — С. 22–30.
69. Трошенькин Б.А. Использование низкопотенциального тепла для получения водорода из воды. — Харьков, 1980. — 38 с. (Препринт АН УССР, Ин-т проблем машиностроения, № 106)
70. Troshenkin V.A. Energy Utilization of Ocean Heat // The First International Conference on New Energy Systems and Conversions: Poster Session Wind, Ocean, Biomass and Other Renewable Energys: Yokohama National University. June 27 (sun)–30 (wed), Japan, 1993. — Prog. 4127.
71. Барилевич В.А., Смирнов Ю.А., Стариков В.И. О тепловой эффективности геотермальных электростанций // Теплоэнергетика, 1985. — № 11. — С. 54–56.
72. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. — М.: Энергия, 1980. — 424 с.
73. Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений. / С.С. Кутателадзе, Б.П. Миронов, В.Е. Накоряков, Е.М. Хабахпашаева. — Новосибирск: Наука СО, 1975. — 168 с.

74. Оликер Н.Н., Пермяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. — Л.: Энергия, 1971. — 186 с.

75. Страхович К.И., Френкель М.И., Кондряков И.К. и др. Компрессорные машины. — М.: Госторгиздат, 1961. — 600 с.

76. Вольфович С.И., Рогозин З.А., Руценко Ю.М. и др. Общая химическая технология. — М.: Госхимиздат, 1955. — Т 2. — 848 с.

77. Стариков В.И. Анализ структуры высоковлажного пароконденсатного потока в криволинейных каналах с целью разработки метода расчета гидропаровых турбин, предназначенных для работы на ГеоТЭС: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Л.: Ленинград. политехн. ин-т, 1986. — 16 с.

78. А. с. 1216376 (СССР). Двухфазная турбина / В.А. Барилевич, В.И. Стариков, В.К. Смехов и др. — Оpubл. в Б.И., 1986, № 9.

79. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. — М.: Химия, 1984. — 256 с.

80. А. с. 397667 (СССР). Способ работы турбоустановки / В.А. Зысин, В.А. Барилевич, Ш.Б. Батуев и др. — Оpubл. в Б.И., 1973, № 37.

81. Эдель Ю.У. Ковшовые гидротурбины. Теория, исследования, расчет. — М., Л.: Машгиз, 1963. — 250 с.

82. Лебедев В.В. Физико-химические основы процессов получения водорода из воды. — М.: Наука, 1969. — 136 с.

83. Черный И.Р., Черный Ю.И. Современное состояние и тенденции развития производства водорода. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1976. — 80 с.

84. Письмен М.К. Производство водорода в нефтеперерабатывающей промышленности. — М.: Химия, 1976. — 208 с.

85. Химические вещества из угля / Пер. с нем. под ред. И.В. Калечица. — М.: Химия, 1980. — 616 с.

86. Капустин М.А. и др. Окись углерода и водород-перспективное сырье для синтезов продуктов нефтехимии. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1981. — 60 с.

87. Степанов А.В. Получение водорода и водородсодержащих газов. — Киев: Наук. думка, 1982. — 312 с.

88. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд. / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов и др. — М.: Химия, 1989. — 672 с.

89. Волова Т.Г., Терсков И.А., Сидько Ф.Я. Микробиологический синтез на водороде. — Новосибирск: Наука СО, 1985. — 118 с.

90. Рыкалин Н.Н., Легасов В.А., Манохин А.И. и др. Перспективы использования атомной энергии в металлургии // Атомно-водородная энергетика и технология. — М.: Атомиздат, 1979. — № 2. — С. 16–31.

91. Хасуй А. Техника напыления. — М.: Машиностроение, 1975. — 288 с.
92. Martin J. Hydrogen — the next five years in the UK // Chem. and Ind., 1984. — № 2. — P. 46–49.
93. Варшавский И.Л. Энергоаккумулирующие вещества и их использование. — Киев: Наук. думка, 1980. — 240 с.
94. Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г. Введение в водородную энергетику. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 264 с.
95. Трошенькин Б.А. Циркуляционные и пленочные испарители и водородные реакторы. — Киев: Наук. думка, 1985. — 174 с.
96. Козин Л.Ф., Волков С.В. Водородная энергетика и экология. — Киев: Наук. думка, 2002. — 336 с.
97. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей. — Киев: Наук. думка, 1984. — 142 с.
98. Паушкин Я.М. Химия реактивных топлив. — М.: Изд. АН СССР, 1962. — 436 с.
99. Богоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 360 с.
100. Полевые газодобывающие водородные установки... / Описание и инструкции по эксплуатации. — М.: Воениздат Наркомата обороны, 1943. — 128 с.
101. Инструкция по безопасной эксплуатации баллонных газогенераторов АВГ-45 и баллонов с водородом. — М.: Гидрометеиздат, 1978. — 32 с.
102. Калекин О.Ю., Герасименко В.Е., Пода В.Б. и др. Погружные генераторы водорода // Тез. докл. Всес. конф. “Химреактор-10”, 25 сент. 1989 г. — Куйбышев-Тольятти, 1989. — III. — С. 139–145.
103. Фигичев Л.И. Аварийно-спасательные и судоподъемные средства. — Л.: Судостроение, 1979. — 30 с.
104. E. Brauer. Verfahren zur Ausnutzung der Temperaturunterschiede von in der Natur vorkommenden Wassermassen, Patentschrift, № 457085, kl. 46d. — gr. 18. — 1928.
105. А.с. № 66738 (СССР). Способ аккумуляирования даровых видов энергии. Г.М. Стронгин. — Оpubл. в Б.И., 1964, № 15.
106. А. Конопка, А. Talib, N. Biederman. The 1st World Hydrogen Energy Conference, 1–3 March, 1976, Miami, Florida, 1976 — Vol. II. — 1В. — 19. — 1В. — 39.
107. А. с. 1675199 (СССР). Сплав для получения водорода / М.Л. Хазин, Н.Ю. Негодаев, Б.А. Трошенькин и др. — Оpubл. в Б.И., 1991, № 33.
108. А. с. 1754643 (СССР). Сплав для получения водорода / А.Л. Завьялов, М.Л. Хазин, Б.А. Трошенькин и др. — Оpubл. в Б.И., 1992, № 30.

109. А. с. 1699896 (СССР). Способ получения водорода / А.Л. Завьялов, В.И. Жучков, Б.А. Трошенькин и др. — Опубл. в Б.И., 1991, № 47.

110. А. с. 1832113 (СССР). Способ получения водорода / А.Л. Завьялов, В.И. Жучков, Б.А. Трошенькин и др. — Опубл. в Б.И., 1993, № 29.

111. Трошенькин Б.А., Трошенькин В.Б. Тепломассообмен при выделении водорода в реакциях аморфно-кристаллических сплавов с водой // ИФЖ, 1996. — 69. — № 6. — С. 1006–1008.

112. Литвиненко А.И., Громов В.А., Янко С.В., Кабанов А.И., Трошенькин Б.А. Требования к углеотходам, применяемым для выплавки ферросиликоалюминия // Металлургия. Труды Запорожской государственной инженерной академии, 2003. — Вып. 7. — С. 38–40.

113. Трошенькин Б.А. Реакторы получения водорода из воды с помощью энергоаккумулирующих веществ // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Атом. водород. энергетика и технология. — 1977. — Вып. 2(3). — С. 171–172.

114. Трошенькин Б.А., Юрченко А.П. Некоторые методы воздействия на процессы, обуславливающие токсичность выхлопных газов транспортных средств // Тез. докл. Всес. конф. “Защита воздушного бассейна от загрязнения токсичными выбросами транспортных средств”, 12–14 окт. 1977 г. — Харьков, 1977. — С. 113–117.

115. Jurmanov V.A., Troshenkin B.A. Automatic facility for generation of hydrogen from water with using aluminium/silicic fusion // World Meteorological Organization. Instrument and Observing Methods Report № 49. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-92), Vienna, Austria, 11–15 May, 1992. — WMO/TD. — № 462. — P. 77–80.

116. Трошенькин В.Б. Совершенствование процесса и реактора по производству водорода из воды при помощи сплавов, получаемых из неорганической части углей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Харьков: Харьковский гос. политехн. универ., 1999. — 16 с.

117. Друинский М.И., Жучков В.И. Получение комплексных ферросплавов из минерального сырья Казахстана. — Алма-Ата: Изд. Наука Казахской ССР, 1988. — 208 с.

118. Цымбал В.П., Богомяков В.И., Толымбеков М.Ж. и др. Эффективность применения ферросиликоалюминия для раскисления стали // Сталь. — 2000. — № 6. — С. 24–26.

119. Терсков И.А., Гительзон И.И., Сидько Ф.Я. и др. Физиолого-биохимические характеристики роста и техника культивирования водородоокисляющих бактерий в проточной культуре // Изв. АН СССР, Сер. биологическая, Наука, 1977, № 4. — С. 541–550.

120. Шмелев-Шампанов О.А., Редикульцев Ю.В., Семенов Я.В. и др. Автотрофный рост *hydrogenomonas eutropha* при оптимальном газоснабжении // АН СССР, Микробиология, 1976. — Т. XV. — Вып. 3–6. — С. 389–393.

121. Подгорный А.Н., Варшавский И.Л., Трошенькин Б.А. Экономичный способ использования разницы температур между слоями воды в океане // Тез. докл. Первой Всесоюзной конференции “Проблемы научных исследований в области изучения и освоения Мирового океана. Комплексные проблемы охраны и использования океанских вод”, 28 сент.—2 окт. 1976 г. — Владивосток, 1976. — С. 67–70.

122. Трошенькин Б.А. Технология использования тепла океана. Тез. докл. Четвертой Всесоюзной конференции “Проблемы научных исследований в области изучения и освоения Мирового океана. Комплексные проблемы энерготехнического использования морской воды”, 25–28 октября 1983 г. — Владивосток, 1983. — Ч. 1. — С. 119–120.

123. Трошенькин Б.А. Использование тепла океана для получения водорода // Вопросы атомной науки и техники. — М.: ИЭА им. И.В. Курчатова, 1977. — 2(3). — С. 164–165.

124. Трошенькин Б.А. Города в океане // Химия и жизнь, 1978. — № 8. — С. 34–37.

125. Сафронов В. Міста-електростанції в океані // Наука і суспільство, 1987. — № 3. — С. 32–35.

126. Лихошерстных Г. В поисках энергии // Техника — молодежи, 1983. — № 11. — С. 26–29.

127. Шпильрайн Э.Э., Семенов А.М. Параэнергетика, или Как не надо искать энергию // Энергия, 1984. — № 4. — С. 38–47.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Основные условные обозначения	4
Введение	6
Глава 1. Естественная циркуляция потоков.....	13
1.1. Циркуляция потоков в геотермальном озере.....	13
1.2. Испаритель с естественной циркуляцией потоков	14
1.2.1. Анализ испарительного цикла.....	16
1.2.2. Расчет контура в первом приближении.....	20
1.2.3. Расчет контура во втором приближении	22
1.2.4. Особенности циркуляционного контура как тепловой машины	23
1.3. Естественная циркуляция потоков на Юпитере.....	24
Выводы.....	25
Глава 2. Термодинамика океана	26
2.1. Закономерности циркуляции потоков в океане	26
2.1.1. Гидродинамическая модель циркуляции.....	27
2.1.2. Газодинамическая модель циркуляции	28
2.2. Испаритель с турбинным приводом циркуляционного насоса.....	33
2.3. Особенности вращения Юпитера.....	41
Выводы.....	43
Глава 3. Термодинамика атмосферы	44
3.1. Газодинамика вертикальных паровоздушных потоков в экваториальной зоне	45
3.2. Газодинамика горизонтальных потоков в системе горных хребтов.....	46
3.3. Атмосфера в периоды похолоданий и потеплений	53
3.4. Причины сокращения периодов оледенений	55
3.5. Особенности вращения Марса	57
Выводы.....	59
Глава 4. Океанические электростанции.....	60
4.1. Энергетическая мощность океана и атмосферы	61
4.2. Анализ предельных циклов океанических электростанций.....	67
4.2.1. Расчет эффективности процесса получения электроэнергии в первом приближении.....	72
4.2.2. Расчет эффективности процесса получения электроэнергии во втором приближении	73
4.3. Совершенствование гидропаровых турбин	78
4.4. Производство энергоемких веществ на океанических электростанциях	83
Выводы.....	90
Послесловие к первой части книги	91
Список литературы	94

Отзывы и пожелания направляйте по адресу:

*ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины
ул. Дмитрия Пожарского, 2/10
61046, Харьков
Украина, Ukraine*

*По этому же адресу Вы можете заказать
дополнительные экземпляры книги.
Книги высылаются по предоплате.*

Наукове видання

Б.О. Трошенькін
Термодинаміка атмосфери та океана. Океанічні електростанції
(російською мовою)

Відповідальний за випуск *Г.Є. Лискова*

Підписано до друку 21.11.2003 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк різнографічний. Гарнітура Літературна.
Ум.друк.арк. 6,045. Обл.-вид.арк. 5,2. Тираж 1000 прим. Зам. №

ТОВ “Видавництво “Форт”.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців
ДК № 333 від 09.02.2001 р.
61023, м. Харків, а/с 10325. Тел. (0572) 14-09-08