

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

В. А. Рожков

# СТАТИСТИЧЕСКАЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

ЧАСТЬ 1  
ТЕРМОДИНАМИКА



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В. А. Рожков

# СТАТИСТИЧЕСКАЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

ЧАСТЬ 1  
ТЕРМОДИНАМИКА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



ББК 26.23

Р63

Рецензенты: д-р геогр. наук, проф. *Г. В. Алексеев* (Арктич. и антарктич. науч.-исслед. ин-т);  
канд. геогр. наук *В. В. Ионов* (С.-Петербург. гос. ун-т)

*Печатается по постановлению  
Редакционно-издательского совета  
факультета географии и геоэкологии  
Санкт-Петербургского государственного университета*

Рожков В. А. Статистическая гидрометеорология. Часть 1. Термодинамика: учеб-  
ное пособие. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2013. — 188 с.

ISBN 978-5-288-05427-3

ISBN 978-5-288-05428-0 (Ч. 1)

Данное учебное пособие посвящено статистическому анализу термодинамических параметров атмосферы и океана. Предпринята попытка рассмотреть с единых позиций фундаментальные вопросы гидрометеорологии с учетом основных факторов, стохастизирующих гидрометеорологические процессы и поля, и формализации детерминистических концепций в виде «неслучайных функций» случайных аргументов. Предполагается, что все гидрометеорологические термины и понятия известны читателям из общих курсов географии, метеорологии, гидрологии и океанологии, курсов теории вероятностей и математической статистики.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по программам подготовки специалистов и магистров гидрометеорологического профиля.

**ББК 26.23**

ISBN 978-5-288-05427-3

ISBN 978-5-288-05428-0 (Ч. 1)

© В. А.Рожков, 2013

© С.-Петербургский государственный  
университет, 2013

## Содержание

Предисловие .....	4
Введение Статистическая гидрометеорология как географическая наука.....	6
Статистический анализ термодинамических параметров атмосферы и океана .....	20
1. Основные положения статистической термодинамики .....	20
2. Термодинамика системы «Солнце–Земля, океан– атмосфера» .....	58
3. Статистический анализ температуры воздуха .....	81
4. Атмосферное давление и центры действия атмосферы .....	103
5. Облака и осадки .....	119
6. Статистический анализ температуры и солености морской воды.....	147
7. Лед в океанах и морях .....	162
8. Основные положения и специфика статистического анализа пространственно- временных полей термодинамических параметров атмосферы и океана .....	186

*Познание любого объекта природы проходит три ступени:*

*— непосредственное его созерцание*

*(внешнее ознакомление с объектом во всей его целостности);*

*— анализ объекта (выделение его из общей естественной связи, расчленение его на части и отражение его сторон рядом абстракций);*

*— синтез (восстановление исходной целостности объекта, но на новой, высшей ступени проникновения в сущность этого объекта).*

*Б. М. Кедров*

## **Предисловие**

Гидрометеорология изучает гидросферу и атмосферу, их свойства, динамику, взаимодействие этих сред между собой и с другими элементами географической оболочки Земли. Изучение проводится как теоретически, так и по натурным данным. Теоретиков в основном интересуют причинно-следственные зависимости между процессами и факторами, их обуславливающими, формализация этих зависимостей чаще всего ищется в виде аналитических или численных решений системы дифференциальных уравнений механики жидкости и газа, выражающих законы сохранения массы, импульса, энергии. Обобщение натурных данных, полученных как на сети гидрометстанций, так и со спутников, проводится с использованием методов теории вероятностей (ТВ) и математической статистики (МС).

Характерным свойством гидрометеорологических процессов и полей является их пространственно-временная изменчивость в различных диапазонах (мелко-, мезо-, макромасштабах) времени (от секунд до десятков лет) и пространства (от сантиметров до тысяч километров).

Физическая интерпретация закономерностей этой изменчивости требует знания не только вероятностных моделей (случайного события, случайной величины или функции), но и представлений об атомно-молекулярном строении вещества (воздуха и воды), квантово-волновой природе солнечного излучения, турбулентном характере движения, а также основных положений статистической физики, термодинамики, гидромеханики. Учитывая результативность этих разделов физики, а также успехи

статистической лингвистики, целесообразно и в гидрометеорологии выделить как специфичный раздел статистической гидрометеорологии.

Предметом статистической гидрометеорологии (СГМ) можно считать описание и физическую интерпретацию закономерностей разномасштабной изменчивости процессов и полей в атмосфере и гидросфере. Термин «изменчивость» подчеркивает вероятностную и статистическую методологию описания ее закономерностей на основе модели многомерной случайной функции, удовлетворяющей системе уравнений статистической гидромеханики и постулатам неравновесной статистической термодинамики.

Данный курс предназначен для специалистов и магистров гидрометеорологического профиля и читается на 5 году обучения. Все гидрометеорологические термины и понятия предполагаются известными из общих курсов географии, метеорологии, гидрологии и океанологии, курсов теории вероятностей и математической статистики.

В настоящем курсе предпринята попытка рассмотреть с единых позиций фундаментальные вопросы гидрометеорологии с учетом основных факторов, стохастизирующих гидрометеорологические процессы и поля, и формализации детерминистических концепций в виде «неслучайных функций» случайных аргументов.

### **Литература**

*Рожков В. А.* Вероятностный анализ и моделирование океанологических процессов // Исследование океанов и морей. Вып. 2. М.: Гимиз, 1995. С. 292–299.

*Рожков В. А.* На пути к статистической гидрометеорологии // Труды ГОИН. Вып. 209. СПб.: Гимиз, 2005. С. 217–247.

*Рожков В. А.* Основные результаты и проблемы вероятностного анализа и моделирования океанологических процессов и полей // Исследование океанов и морей. М.: Гимиз, 1983. С. 171–184.

*Рожков В. А.* Статистическая гидрометеорология как географическая наука // Труды 12 съезда РГО. Т. 5. СПб., 2005. С. 137–143.

*Рожков В. А.* Статистическая океанология // Океанология в Санкт-Петербургском университете. СПб.: Изд. СПбГУ, 1997. С. 89–108.

*Рожков В. А.* Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб.: Прогресс-погода, 1996. 560 с.

*Рожков В. А.* Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб., Кн. 1. 2001. 340 с. Кн. 2. 2002. С. 343–780.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

#### 1. Основные положения статистической термодинамики

Название «термодинамика» происходит от греческих слов «therme» — теплота и «dynamics» — сила и расшифровывается как «наука о силах, связанных теплом» (а не о движении тепла). Предметом термодинамики является исследование процессов, для описания которых требуется ввести понятие температуры. Феноменологическая термодинамика изучает связь между макроскопическими величинами, характеризующими систему, например между давлением, температурой и энергией, без описания микроскопических (атомных, молекулярных) явлений. Она опирается на строгие определения принятых понятий, прежде всего температуры и тепла, а также на несколько весьма общих аксиом, называемых законами термодинамики, установленных опытным путем. Статистическая термодинамика исходит из того, что большое число частиц в макроскопических телах приводит к появлению статистических закономерностей в поведении тел.

**Тело и фаза.** *Тело* — вещество, заполняющее определенный объем (вода, воздух, железо и т. д.), характеризующееся упругостью, плотностью, степенью нагретости и другими физическими признаками. Если эти признаки одинаковы, то тело *физически однородно*, неоднородность формулируется по определенному признаку (плотности, нагретости и т. д.). Если тело представляет *смесь* (а не химическое соединение), то говорят, что тело *химически неоднородно*. Воздух, как смесь газов, химически неоднороден. Химически неоднородное тело может иметь *однородный состав*, если во всех его участках разные вещества в смеси содержатся в одинаковой пропорции. Вследствие постоянства солевого состава морская вода может рассматриваться как двухкомпонентная смесь: чистая вода и соль.

Все признаки, характеризующие тело и имеющие объективную меру, называют *термодинамическими параметрами состояния тела*. Состояние тела может быть изменено нагреванием, охлаждением, сжатием и т. п.

Физически однородное тело или совокупность нескольких тождественных по составу тел, находящихся в тождественных равновесных состояниях, обозначают термином

фаза. Тело называют фазой, если, разделив тело любым способом на произвольное число частей, можно обнаружить их тождественность. Лед, плавающий в воде, — это две фазы. Одно и то же вещество (например, вода) может иметь несколько фаз, отличающихся кристаллической структурой (например, пар — вода — лед, 7 модификаций льда). Отметим, что существует 4 агрегатных состояния (жидкое, газообразное, твердое, плазменное), а фаз может быть множество (например, нефть в воде, обе жидкие).

**Простейшие параметры: масса, объем, давление.** Общая *масса* тела для термодинамики несущественна (она является основной для механики), и ее связывают с *плотностью*, под которой понимают отношение массы тела к его объему, т. е. массу, содержащуюся в единице объема. В термодинамике наибольший интерес вызывает изменение *плотности* (как результат сжатия, нагревания и т. д.), при этом масса остается прежней, а меняется объем тела. Следовательно, более удобен *удельный объем*, т. е. объем, занятый единицей массы (величина обратная плотности). Масса характеризует свойства инертности и проявляется при изменении состояния движения. В термодинамике, вместо принятой в механике единицы массы (грамм, килограмм), чаще всего используется химическая единица массы — моль. *Модем* или *грамм-молекулой* называют количество вещества в граммах, совпадающее с молекулярным весом. Моль любого вещества содержит  $N_A = 6,0247 \cdot 10^{23}$  молекул (число Авогадро). Для химически неоднородного вещества вводят *средний* (гармонический) *молекулярный вес*. Например, воздух (76% азот, 23% кислород, 1% аргон) имеет молекулярный вес 28,9.

В термодинамике при изучении систем подвижных тел рассматривают действующие на них силы, уравновешенные вокруг центра тяжести. Напряженность внешних сил измеряют *давлением*, которое силы производят на единицу поверхности тела.

В статистической термодинамике давление  $P$  определяют как среднюю силу воздействия молекул на единичную площадку поверхности, окружающей объем.

Физические закономерности, возникающие в ансамблях однородных объектов (атомов, молекул), называются статистическими. Термин «газ», происходящий от слова «хаос», возник еще в XVII в. на основе атомистических представлений древних. В том же веке экспериментально был установлен закон Бойля — Мариотта:

*Для данной массы газа при постоянной температуре произведение объема  $V$  на давление есть величина постоянная:*

$$PV = \text{const.} \quad (1)$$



Даниил Бернулли в 1730 г. сумел вывести этот статистический закон теоретически.

Предположим, что газ находится в ящике, одна стенка которого представляет поршень, способный перемещаться. Газ состоит из атомов, хаотически перемещающихся со скоростью  $\mathbf{U}$ ; составляющие вектора  $\mathbf{U}$  обозначают через  $u_x, u_y, u_z$ . Импульс — это произведение массы  $m$  на скорость  $\mathbf{U}$ , и, по второму закону Ньютона, скорость изменения со временем количества движения (импульса) пропорциональна силе  $\mathbf{F}$ .

Пусть в объеме  $V$  заключено  $N$  атомов, а в единичном объеме

$$n = N/V \text{ атомов.} \quad (2)$$

За одно соударение поршню сообщается импульс  $2mu_x$  (удвоение произошло, так как частица отражается, следовательно, импульсы к поршню и от поршня равны  $mu_x$ ). За время  $t$  ударят лишь те частицы, которые в начальный момент были расположены не дальше, чем на расстоянии  $u_x t$ .

Пусть площадь поршня  $S$ , тогда атомы, которые ударят по поршню, занимают объем  $Su_x t$ , число атомов —  $nu_x St$ , а за 1 с —  $nu_x S$ .

Сила  $F = nu_x S \cdot 2mu_x$ , а давление  $P = F/S = 2nmu_x^2$ . Каждая молекула, ударяясь в поршень, вносит свой вклад; осредняя их, получим

$$P = nm(u_x^2). \quad (3)$$

Отметим, что при осреднении (обозначаемом угловыми скобками) необходимо учесть  $1/2$  в  $u_x^2$ , так как нас интересуют лишь положительные  $u_x$ . Исходя из того, что  $u_x^2 = u_y^2 = u_z^2$  получим  $(u_x^2) = (U^2)/3$ .

Теперь (3) будет иметь вид

$$P = \frac{2}{3} n \left( \frac{m\bar{U}^2}{2} \right), \quad PV = N \frac{2}{3} K, \quad K = \left( \frac{m\bar{U}^2}{2} \right), \quad (4)$$

где множитель  $K$  — кинетическая энергия молекул. Вспоминая (2), имеем (4).

Таким образом, исходя из простейших предпосылок:

- физические законы движения молекул (второй и третий законы Ньютона),
- стохастичность движения молекул газа,

теоретически выведен закон Д. Бернулли (1) и обоснована константа. Поскольку скорость движения молекул зависит только от температуры газа и так как в правой части (4) стоит кинетическая энергия, то и она должна быть функцией температуры.

**Тепловое равновесие и температура.** Температура является важнейшим термодинамическим параметром. Своим существованием температура как величина обязана статистической закономерности, господствующей над молекулярными явлениями. Законы статистики обуславливают особый вид равновесия — *тепловое равновесие* тел, а оно влечет представление о *температуре*. При теплообмене без теплового равновесия происходит изменение, по меньшей мере, одного из параметров состояния, не считая температуры. Если взять сколько угодно и каких угодно тел, обеспечить возможность теплообмена между ними и изолировать их от посторонних воздействий, то рано или поздно между ними установится тепловое равновесие. В процессе взаимного приспособления тел к тепловому равновесию их состояние меняется тем резче, чем меньше масса одного по сравнению с массой другого.

В физике приняты три всеобщих (но произвольных) эталона — сантиметр, грамм и секунда. Исходя из (4) нет необходимости во введении еще одной единицы (эталона) — градус (не уточняя Цельсия, Фаренгейта, Реомюра, Кельвина, Делиля), достаточно ввести условное вещество — идеальный газ. Например, температуре  $T$  можно придать весьма простой физический смысл — она равна  $2/3$  средней кинетической энергии  $\langle K \rangle$ :

$$T = 2/3 \langle K \rangle. \quad (5)$$

Из (5) видно, что  $T$  — величина статистическая (для отдельной молекулы она не имеет смысла). Хотя Д. Бернулли не пытался выразить  $PV$  через температуру, но в его работе уже содержится фраза «теплота есть движение молекул».

Учение о теплоте очень долгое время развивалось независимо от статистической физики, лишь в конце XIX в. получило обоснование. В 1877 г. международный комитет мер и весов установил нормальную шкалу эмпирической температуры: в качестве термометрического вещества — водород, в качестве термометрического параметра — давление, в качестве единицы измерения — градус Цельсия.

**Термодинамика идеальных газов.** Для разреженных газов справедливы законы Бойля, Гей-Люссака и Джоуля. По закону Бойля при изотермическом сжатии или расширении газа давление изменяется обратно пропорционально объему (1). По закону

Гей-Люссака нагревание газа на  $1^\circ\text{C}$  при постоянном давлении  $P$  влечет за собой его расширение на  $1/273,15$  часть того объема  $V_0$ , который он занимает при  $0^\circ\text{C}$  и при том же давлении  $P$ . Совместно эти законы дают уравнение Клайперона — Менделеева:

$$PV = \nu RT, \quad (6)$$

где  $\nu$  — число молей, содержащихся в объеме  $V$ ,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — абсолютная температура.

Числовое значение  $R$  зависит от выбора единиц для  $P$ ,  $V$ ,  $T$  при  $0^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 273,15$ ),  $P_0$  в 1 атмосферу,  $V_0 = \nu \cdot 22,41$  л:

$$R = (P_0 V_0 / 273,15) = 0,08206 \text{ атм} \cdot \text{л} / \text{град г} \cdot \text{моль}.$$

*Теплоемкость системы* — количество тепла  $\delta Q$ , которые надо сообщить замкнутой системе, чтобы увеличить ее температуру  $T$  на один градус. Обычно рассматривают теплоемкость  $C_p$  при постоянном давлении и теплоемкость  $C_v$  при постоянном объеме:

- для одноатомных газов  $C_v = 3/2 R \approx 3$  кал;
- для двухатомных газов  $C_v = 5/2 R \approx 5$  кал;
- для многоатомных газов  $C_v = 3 R \approx 6$  кал.

(7)

Для газов любой атомности справедливо уравнение Р. Майера:

$$C_p - C_v = R. \quad (8)$$

К реальным газам применяют уравнение состояния:

$$(p + a/V^2)(V - b) = RT, \quad (9)$$

предложенное в 1873 г. голландским физиком Ван-дер-Ваальсом. Оно отличается от (6) двумя поправками — объемной  $b$  и внутренним давлением  $a/V^2$ ; для химических веществ  $a$  и  $b$  различны. Существует много других уравнений вида (9).

**Первое начало термодинамики.** Существует факт, управляющий всеми явлениями природы, — закон сохранения энергии. Он утверждает, что имеется определенная величина, называемая энергией, которая не изменяется ни при каких превращениях, происходящих в природе. В механике различают 4 формы передачи энергии: тяга,

удар, волновая передача, конвекция. Под конвекцией понимают перенос веществом любого вида энергии.

Энергия разделяется на потенциальную энергию (тяготения), кинетическую (движения) и внутреннюю (тепловую).

В термодинамике передаваемая энергия разделяется на 2 части: на тепло и работу. *Работа* (в термодинамическом понимании) — это *любая макрофизическая форма передачи энергии*, а теплота представляет собой совокупность микрофизических передач энергии. *Работа расширения* — *элементарная работа  $\delta A$ , выполняемая телом в процессе равновесного расширения*. Она всегда равна произведению давления  $P$  на элементарное приращение объема  $dV$ :

$$\delta A = PdV.$$

Когда выполняется работа, имеется 2 тела: одно, развивающее силы и совершающее работу, другое, к которому эти силы приложены. Работа всегда совершается за счет запасов энергии и всегда на что-то затрачивается, т. е. вызывает какие-либо изменения в некотором другом теле. Первое тело отдает энергию, второе получает. Сам процесс работы есть процесс перехода энергии от одного тела к другому.

Точно также, когда проявляется теплота, имеется 2 тела: одно отдает энергию, другое получает. Внутренняя энергия тела является единственным видом энергии, имеющей статистическую основу, поэтому конвекция внутренней энергии всегда должна рассматриваться как перенос тепла.

Теплота и работа являются двумя единственно возможными формами перехода (способами передачи) энергии от одного тела к другому.

Теплота и работа — неравноценные формы передачи энергии. Работа непосредственно направлена на пополнение запаса любого вида энергии; теплота непосредственно (без промежуточного преобразования в работу) направлена на пополнение запаса только внутренней энергии.

**Формы движения и виды энергии.** Вид энергии — термин физики; форма движения — философское понятие (включая и биологию, и социальные науки). В области физики рассматривается неупорядоченное молекулярное (тепловое) движение, и ему соответствует особый вид энергии — внутренней.

В механике различают следующие виды энергии:

— энергия движения тел (поступательного, вращательного, колебательного);

- энергия положения тел в поле сил (электрических, магнитных, потенциальная энергия в поле тяготения);
- энергия упругой деформации тел (деформация растяжения, сжатия, сдвига).

В термодинамике различают внешнюю и внутреннюю энергии тел. Для внешней энергии различают следующие виды:

- энергия движения тела как целого;
- энергия положения тела в поле сил (с оговоркой, что термодинамическое состояние тела при перемещении в поле сил не изменяется).

Если же термодинамическое состояние при этом меняется, то определенная часть энергии положения при этом уже будет входить в состав внутренней энергии тела.

Внутреннюю энергию в термодинамике разбивают на две термодинамические составляющие:

- связанная энергия;
- свободная энергия.

Мерой связанной энергии является теплота, отдаваемая в изотермическом процессе. Мерой свободной энергии является работа, производимая телом при изотермическом процессе.

В прикладной физике различают механическую энергию, потенциальную энергию тяготения, внутреннюю энергию нагретых тел, акустическую энергию, лучистую энергию (подразделяя ее на энергию света, тепловое излучение, фотохимическую, рентгеновских лучей, космических лучей), электрическую энергию.

**Внутренняя энергия.** По закону Джоуля внутренняя энергия  $\epsilon$  идеального газа пропорциональна абсолютной температуре:

$$\epsilon = \nu C_V T, \quad (10)$$

где  $C_V$  — теплоемкость при постоянном объеме, не зависящая ни от температуры, ни от плотности газа.

В слабо сжатых газах, где взаимодействие между молекулами проявляется лишь в их соударении, внутренняя энергия складывается из поступательного и вращательного движения молекул, а также и внутриатомной энергии.

В 1870 г. Максвелл вывел закон распределения по скоростям, а позднее — Больцман — по кинетическим энергиям.

*Распределение Максвелла.* Допустим, что проекции скорости молекул ( $u_x, u_y, u_z$ ) независимы, следовательно, их вероятности перемножаются:

$$p(u_x, u_y, u_z) = p(u_x)p(u_y)p(u_z). \quad (11)$$

Максвелл вывел законы одной (12) и трех (13) проекций скорости:

$$p(u_x) = (m / 2\pi T)^{1/2} \exp(-\frac{mu_x^2}{2T}), \quad (12)$$

$$p(\vec{U}) = (m / 2\pi T)^{3/2} \exp(-K / T), \quad (13)$$

где

$$U^2 = u_x^2 + u_y^2 + u_z^2.$$

Этот результат был проверен и экспериментально, используя разреженный газ и вращающиеся сосуды. В терминах распределения (13) формулируется понятие статистического равновесия (не меняющегося со временем).

*Распределение Больцмана.* Двухатомные молекулы ( $N_2, H_2, O_2$ ) имеют не только переносное движение, но и вращение вокруг центра тяжести. Поэтому их энергия

$$E = K_{\text{пер}} + K_{\text{вращ}}.$$

Для баланса энергии при столкновении молекул с энергиями  $E_1$  и  $E_2$  до удара и  $E_3, E_4$  после удара необходимо, чтобы

$$E_1 + E_2 = E_3 + E_4,$$

или с учетом (13)

$$p(E) = B \exp(-E / T),$$

где  $B$  — коэффициент, нормирующий вероятность.

Кинетическая энергия молекул и внутриаомная энергия от плотности газа почти не зависят и являются функцией одной лишь температуры. Это следует из закона равномерного распределения энергии по степеням свободы (Максвелл, 1860). Под числом

степеней свободы подразумевают число независимых движений или число координат, которые определяют положение тела в пространстве.

Каждый одноатомный газ (аргон, гелий) имеет 3 степени свободы при независимых движениях в направлении трех взаимно перпендикулярных координат; каждая молекула трехатомного газа (пары воды) и многоатомного газа — 6 степеней свободы. Это является обоснованием соотношений (7).

По закону Максвелла, каждая степень свободы движения молекулы (независимо от характера движения и химической природы вещества) в среднем обладает энергией

$$E = \frac{k}{2} T,$$

где  $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/град. — половина постоянной Больцмана,  $N_A$  — число Авогадро.

В состав внутренней энергии входит часть гравитационной энергии, обусловленная внутренними силами тяготения молекулы, кроме того, входит лучистая энергия, обеспечивающая тепловое равновесие между отдельными участками тела.

**Второе начало (закон деградации энергии).** Невозможен процесс, имеющий единственным своим результатом превращение тепла в работу. В природе и технике превращение тепла в работу встречается столь же часто, как и переход работы в теплоту. На поверхности земного шара ветры, дожди, реки, водопады производят непрерывно работу за счет теплоты, которое доставляет Солнце.

Когда происходит преобразование  $A$  в  $Q$ , то можно ограничиться изменением термодинамического состояния только лишь в теплополучающем теле (например, нагревание путем трения). Когда происходит преобразование  $Q$  в  $A$ , то наряду с охлаждением теплоотдающего тела непременно происходит изменение термодинамического состояния еще одного или нескольких тел (оно называется *компенсацией* превращения  $Q$  в  $A$ ).

Процесс, происходящий при постоянной температуре, называется изотермическим; процесс, происходящий в теплоизолированном цилиндре, когда сжатие и расширение происходит без теплообмена с окружающей средой и без нарушения теплового расширения газа, называют адиабатическим. Термин «адиабатический» образован от трех греческих слов  $a$  (не) +  $dia$  (сквозь) +  $bai-nein$  (проходить), в физике он употребляется в разных смыслах. Поэтому требуется всегда уточнить его смысл.

Давление и температура определены путем усреднения молекулярных микроскопических величин. Давление есть средний импульс, переданный стенке при ударах отдельных молекул, температура связана со средней энергией молекул. Начиная с первых шагов кинетической теории механические явления рассматривались как первичные, а термодинамические — как вторичные. Клаузиус в 1865 г. придал феноменологической термодинамической теории законченную форму, введя новую функцию состояния — *энтропию* (от греческого «эволюция»). Он осознал, что в основу тепловых явлений необходимо положить два принципа, один из которых выводится из эквивалентности механической и тепловой энергий, а второй — из необратимости процессов превращения тепла в механическую работу. Все так называемые необратимые процессы в природе типа

- теплопроводности (выравнивание разности температур),
- вязкости (выравнивание разности скоростей),
- диффузии (выравнивание разности плотностей)

сопровождаются рассеянием механической энергии.

Изменение энтропии в замкнутой системе есть мера необратимости свершившихся в ней процессов. Посредством энтропии  $\eta$  температура  $T$  связана с количеством тепла  $dQ$ , получаемым системой при обратимых процессах, соотношением

$$dQ = Td\eta;$$

для необратимых процессов справедливо соотношение в форме неравенства

$$dQ \leq Td\eta.$$

Клаузиус сформулировал второе начало термодинамики в форме следующих утверждений:

- энтропия является однозначной функцией состояния;
- элемент тепла при равновесном процессе, деленный на абсолютную температуру тела, является полным дифференциалом энтропии

$$d\eta = \frac{\delta Q}{T}. \tag{14}$$



Учебное издание

Рожков Валентин Алексеевич

**Статистическая гидрометеорология**

**Часть 1. Термодинамика**

*Учебное пособие*

Компьютерная верстка *О. Г. Невской*  
Редактор *Н. М. Баскакова*

Подписано в печать 02.08.2013. Формат 70 × 100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 15,3.

Тираж 250 экз. Заказ №

Издательство СПбГУ  
199004, С.-Петербург, В.О., 6-я линия, 11/21  
Тел./факс (812)328-44-22  
E-mail: editor@unipress.ru  
www.unipress.ru

Типография Издательства СПбГУ  
199061, С.-Петербург, Средний пр., 41.