

А.А. Саткевич

Основной курс термодинамики

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
А11

А11 **А.А. Саткевич**
Основной курс термодинамики / А.А. Саткевич – М.: Книга по Требованию, 2021. – 288 с.

ISBN 978-5-458-57735-9

ISBN 978-5-458-57735-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

А. А. САТКЕВИЧ

Профессор Военно-Технической Академии и Ленинградских Институтов:
Инженеров Путей Сообщения и Политехнического

ОСНОВНОЙ КУРС ТЕРМОДИНАМИКИ

3-е (1-е печатное) издание

ИЗДАНИЕ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ Р. К. К. А.

ЛЕНИНГРАД

1925

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора	Стр. IX
---------------------	------------

Введение.

1. Общая программа курса	1
------------------------------------	---

I. Теоретические основы термодинамики.

A. Общий принцип сохранения энергии в его влиянии на термодинамику.

2. Краткая историческая справка	5
3. Закон живых сил или закон работ теоретической механики	6
4. Принципы сохранения энергии	8
5. Термодинамическое выражение принципа сохранения энергии	9

Б. Первый закон термодинамики.

6. Основные переменные (параметры), характеризующие состояния системы	12
7. Общая аналитическая формулировка 1-го закона	14
8. Механический эквивалент теплоты	16
9. Выражение механической работы при посредстве основных параметров	18
10. Механическая обратимость процессов	23
11. Метод графических представлений в термодинамике	28

В. Второй закон термодинамики.

12. Температура, как основное понятие в учении о теплоте	31
13. Понятие об обратимости процессов — вообще и в частности — о термической их обратимости	33
14. Цикл Карно	34
15. Постулаты Кляузиуса и его видоизменения	37
16. Вывод второго закона термодинамики для случая обратимого цикла Карно	40
17. Вывод второго закона термодинамики для какого-нибудь обратимого цикла	45
18. Распространение вывода второго закона на обратимый процесс незамкнутый	47
19. Роль энтропии в числовых и графических исследованиях термодинамики; энтропийная диаграмма	49
20. Понятие об экономическом коэффициенте циклов и в частности — цикла Карно	51
21. Вывод второго закона термодинамики в применении к необратимым процессам. Энтропия тела	53
22. Попытки расширения смысла второго закона термодинамики до общего мирового закона	58

Г. Основные термодинамические зависимости.

23. Связь между частными производными, как следствие существования лишь двух основных параметров	61
24. Аналитическое сопоставление двух законов термодинамики	62
25. Дополнительные зависимости, вытекающие из возможности принятия различных пар параметров за основные	67
26. Понятие о термодинамических потенциалах.	68

II. Специальный термодинамический анализ газообразных тел.

27. Предварительные соображения	72
---	----

А. Совершенные газы.

28. Основные свойства и характеристическое уравнение совершенных газов	75
29. Установление единиц для измерения абсолютных температур	78
30. Основная зависимость между теплоемкостями совершенного газа; положение Реньо-Кляузиуса.	80
31. Внутренняя энергия, теплосодержание и энтропия совершенного газа	81
32. Однородные смеси совершенных газов, не действующих химически друг на друга	83
33. Типичные процессы с совершенными газами и их аналитическая характеристика	87
34. Числовая таблица характеристических свойств различных газов и сопоставление формул для типичных процессов с совершенными газами	95
35. Приемы решения задач, относящихся к совершенным газам	96

Б. Влажные пары.

(Насыщенные пары с избытком соответствующих капельных жидкостей).

36. Насыщенный пар с избытком капельной жидкости, как двухфазная система	105
37. Основные законы испарения и их аналитические выражения в применении к влажному пару	107
38. Введение паросодержания, как основного параметра, в формулы для влажного пара	110
39. Типичные процессы с влажными парами и аналитическая их характеристика	116
40. Опытный числовой материал, касающийся насыщенного водяного пара; таблицы числовых данных. Сопоставление формул для типичных процессов.	121
41. Приемы решения задач, относящихся к влажному водяному пару	127
42. Графические изображения свойств водяного пара в диаграммах работ и энтропийной и применение их к решению задач на изменение состояний пара	184
43. Диаграмма Молье для водяного пара и ее выгодные качества по сравнению с другими типами диаграмм	146

Г. Перегретые пары, как переход к реальным газам.

44. Попытки установления непрерывной связи между газообразным и жидким состояниями тела: уравнения Фан-дер-Ваальса, Кляузиуса и их модификации.	150
45. Характеристическое уравнение перегретого водяного пара; табл. Молье и др.	154
46. Приемы решения задач, относящихся к перегретому водяному пару	159

III. Термодинамика газообразных тел, обладающих поступательным движением.

47. Полное уравнение термодинамики, учитывающее поступательное движение тела.	165
48. Специальное выражение полного уравнения термодинамики в случае движения струевого. Обобщенное уравнение Даниила Бернулли	167
49. Применение уравнения термодинамики движущегося газообразного тела к частным случаям: а) Мятне (дросселирование) газа или пара. б) Истечение газа или пара из отверстий и насадков	174
50. Физические условия истечения газов и паров. Критические давление и скорость.	180
51. Примеры числового учета термодинамических процессов дросселирования и истечения газообразных тел, обладающих поступательным движением.	185

IV. Основы теории тепловых машин.

52. Основная классификация тепловых машин	189
53. Коэффициент полезного действия теплового двигателя и составляющие его факторы.	191

А. Идеальные циклы главнейших типов промышленных тепловых двигателей.

а. Двигатели внутреннего горения.

54. Двигатели с быстрым горением рабочей смеси. Теоретический цикл исполняемой ими работы	196
55. Исследование экономичности теоретического цикла двигателя с быстрым горением рабочей смеси	199
56. Действительная практическая экономичность двигателя с быстрым горением.	208
57. Двигатели с постепенным горением топлива (Двигатели Дизеля). Теоретический их цикл и исследование экономичности этого цикла	208
58. Практические свойства и экономичность работы двигателей Дизеля	207

б. Двигатели паровые, работающие водяным паром.

59. Теоретический цикл парового двигателя	208
60. Экономичность теоретического цикла парового двигателя	211
61. Практический цикл парового двигателя. Конденсация пара стенками цилиндра и меры к ее уменьшению	212
62. Паровая турбина, как специальная форма парового двигателя. Общая ее характеристика	217

Б. Основные сведения из теории холодильных машин.

63. Общие идеи устройства холодильных машин	222
64. Термодинамический анализ работы испарительных компрессионных холодильных машин: Предварительные соображения и исходные физические данные	229
65. Сравнительный числовой учет работы различных веществ в компрессионной холодильной машине: Расчет их объемного действия	231
66. Расчет экономичности работы различных веществ в компрес. холодильной машине	236

	Стр.
67. Общее сопоставление свойств тел, применяемых в компрес. холодильных машинах	244
68. Особые системы холодильных машин: Машины—водяного пара и воздушная	245
69. Успехи техники достижения особо-низких температур	248

В. Понятие о калориметрическом исследовании тепловых машин.

70. Назначение калориметрического анализа и общий его план в применении к одиоцилиндровой паровой машине	251
--	-----

Дополнение.

Основы кинетической теории газов.

71. Теплота, как движение частиц тела	256
72. Вывод основных зависимостей для случая совершенных газов	257
73. Основные законы термодинамики в освещении кинетической теории газов	263
74. Вероятность и энтропия	266
75. Заключение	269
Таблица данных насыщенного водяного пара (по Mollier)	271

ОТ АВТОРА

Курсу термодинамики в учебных планах высших технических учебных заведений отводится в настоящее время сравнительно малое число часов, несмотря на всю значительность инженерных приложений этой науки и на ее исключительную научно-воспитательную ценность. Не входя в оценку причин этого факта, отмечу здесь создаваемые им затруднения в пользовании для преподавания печатными курсами и трудами по термодинамике, объем и фактическое содержание которых совершенно не укладываются в отводимое краткое учебное время. Обстоятельство это приводит к необходимости издания учебными заведениями литографированных руководств, специально приспособленных к учебным требованиям и кругозору аудитории, сосредоточивающих свое внимание на уяснении курсовых основ предмета и приводящих фактический числовой материал лишь в пределах, доступных усвоению к моменту очередных зачетов и испытаний. Выдержав несколько литографированных изданий, такие курсы иногда переиздаются в печатном виде, но при этом получают значительное расширение объема, включением в них обычно встречаемых в печатных руководствах по термодинамике сведений фактического и справочного характера, невольно затемняющих своим „нагромождением“, если можно так выразиться, идейные основы курса и потому лишающих его непосредственной применимости с чисто учебными целями.

Идя по такому пути, я стою сейчас перед возможностью печатания моего курса термодинамики, после двух его литографированных изданий, в 1906—09 и в 1912 годах, и после значительного промежутка почти полного его отсутствия на книжном рынке. Однако, взявшись за исполнение этой задачи, я решил сохранить, вопреки обыкновению, и в печатном издании, в мере возможности, общий тон и характер чисто-учебного руководства, согласованного с непосредственными запросами преподавания, т. е., преследующего прежде всего цели раз'яснения предмета по существу и всячески устраняющего прикладные детали справочного характера, хотя и полезные сами-по-себе, но разбивающие своим присутствием в курсе внимание изучающих его, во вред отчетливости и надежности усвоения. Я позволил себе при этом не гнаться за особой конспективностью и сжатостью изложения, считая, напротив, необходимым соблюдать возможно-полную последовательность развития мыслей, внимательно

останавливаться над каждым могущим наводить на размышления и сомнения вопросом, т. е., старался вообще поставить себя в положение лица, ведущего систематичную научную беседу с читателем и разъясняющего ему сущность термодинамических представлений и методов. Мне кажется, что такого типа учебные книги особенно необходимы в настоящее время, когда прохождение курсов высших учебных заведений обусловливается в значительной мере требованием самостоятельности обучающихся.

Обращаясь к самому построению курса по плану и содержанию, я должен обратить внимание на некоторую допущенную в нем своеобразность идейной последовательности изложения и взаимного координирования научного материала, применительно к тому построению курса, к которому привела меня долголетняя практика его преподавания. Выпуская его теперь впервые в печатном виде в такой несколько оригинальной переработке, я счел целесообразным предварительно вынести на суд широких научных кругов свои общие точки зрения на построение курса термодинамики, что и исполнил в сентябре 1924 года в форме доклада „4-му Съезду русских физиков“ в Ленинграде на тему: „оценка идейной последовательности в изложении основ термодинамики“. Текст моего доклада передан мною затем для напечатания в трудах названного съезда, где желающие смогут, вероятно, найти мои методологические соображения и более или менее подробные мотивировки высказывавшихся мною положений. Здесь же я считаю нужным привести лишь краткую передачу этих положений, воспользовавшись тою их формулировкой, которая была отпечатана ко времени заседаний Съезда, так как здесь это предварительное сообщение идейного плана курса должно иметь лишь осведомительный характер, пред лицом фактического его осуществления на протяжении всей книги и в условиях программной характеристики ее содержания, приводимой на первых-же ее страницах—во введении.

Вот, в общем, те мысли о целесообразном построении учебного руководства по термодинамике, которые были мною доложены 4-му Съезду русских физиков:

1. Основные законы термодинамики желательно излагать ранее учения о соверш. газах и влажных парах и вне зависимости от них, что заставляет лишь не устанавливать временно связи температуры абсолютной с Цельсиевой, но зато охраняет устойчивость этих основ термодинамики, не зависящих от гипотетических представлений о природе совершенного газа.

2. Первый, главнейший, закон термодинамики надлежит формулировать сразу-же в применении к более широкому, чем это обычно делается, его толкованию, отражая в нем принцип сохранения энергии в форме одновременного учета и термодинамических, и чисто-механических процессов, т. е., не устрояя из кругозора неуравновешивающихся около центра тяжести изучаемого тела сил, что содействует более отчетливому пониманию существа термодинам. зависимостей и, кроме того, при изучении термодинамических явлений в дви-

жущихся телах, например, в теории паровых турбин, не зарождает лишних сомнений в непосредственной применимости к этому специальному анализу выводов основной части курса.

3. Изучение этого 1-го закона в условиях игнорирования чистомеханических процессов, т. е., в условиях предполагаемого отсутствия переноса центра тяжести изучаемого тела, желательно сопровождать анализом тех силовых систем, при действии которых такие процессы действительно осуществимы, чтобы избежать необоснованного введения одинаковости сил упругости во всех точках тела.

4. Понятие о теоретической обратимости процессов следует расчленять на понятия об обратимости механической и об обратимости термической, приурочивая первое уже к 1-му закону термодинамики, как необходимую предпосылку к построению формулы механической работы в зависимости от упругости и изменения объема тела.

5. При построении 2-го закона термодинамики необходимо с особою отчетливостью устанавливать гипотетическое положение о возможности термодин. изучения тел на основе двух независимых параметров, так как такое положение является необходимой предпосылкой к доказательству этого закона при помощи представления о цикле Карно, смыкание графического изображения которого основано на отнесении его к двум независимым переменным. Эту логическую предпосылку ко 2-му закону надлежит формулировать в виде определенных основных условий с обязательством подходить с этими именно условиями к построению учения об отдельных типах тел (газах, парах).

6. Установление неравенств Кляузиуса должно сопровождаться не только указанием на то, что стоящая в знаменателях их диф-ных выражений абсолютная температура относится к внешним источникам тепла, но также и соображениями, убеждающими, что при замене этой температуры температурой самого тела неравенства должны переходить в равенства, что необходимо для возможности использования затем, при спец. термодин. изучении тел, понятия об их энтропии и что, по существу, вполне согласуется с идеею определенности свойств тела его основными параметрами.

7. Учение о совершенных газах целесообразнее всего, по моему мнению, обосновывать так, как делает Брайен (Bryan) в своей Термодинамике, — выставляя, на-ряду с законом Бойля — Мариота, вторым — тот закон Гей-Люсака — Джауля, который устанавливает постоянство внутр. энергии газа тоже при неизменной температуре, что согласуется с временной невыясненностью, в предыдущем отделе о законах термодинамики, меры абсол. температур и, вместе с тем, отвечает высказанному в п. 5-м требованию обоснования допустимости лишь двух параметров, в применении к совершенным газам. При этом, обычно вводимый в исследование закон Шарля — Гей-Люсака об изменении при пост. давлении объема газов в связи с Цельсиевою температурой и служит для установления связи между температурами абсолютною и Цельсиевою.

8. Обоснование учения о насыщенном паре и о сочетании его с капельною жидкостью, в форме влажного пара, требует такой форму-

лировки свидетельств опыта, которая гарантировала бы и в отношении этих тел соблюдение условий применимости к ним двух независимых параметров.

9. Учение о кинетической природе тепла желательно вводить в изложение лишь по завершении всех основных отделов курса—с целью, в мере возможности, охранить независимость основных положений термодинамики от гипотетич. представлений о сущности теплоты.

К этим, доложенным С'езду, мыслям добавлю здесь еще одну:

10. Изучение термодинамических свойств газов и паров и процессов с ними желательно не только иллюстрировать решением частных числовых задач, но сопроводить разработкою общих приемов решения таких практических примеров, чтобы дать в руки обучающегося подготовленные средства подхода к вопросам практики. Конечно, при этом должны быть учтены и графические средства решения таких задач.

Кроме этих соображений принципиального порядка, коснусь здесь мотивировки некоторых допускаемых мною в самом изложении курса более мелких, так сказать—формальных, особенностей, а именно:

1. Для более отчетливого выделения количеств, относящихся ко всему весовому количеству изучаемых тел, от количеств, относимых к каждой их весовой единице, две эти категории количеств отличаются на протяжении всего курса тем, что первые обозначены большими, а вторые малыми буквами, с сохранением одинаковости самой буквы для количеств одного рода. Так, объем G килограммов тела обозначается буквою V большой, объем же каждого килограмма того же тела—буквою v малой, энтропия всего количества тела—буквою S большой, энтропия килограмма его—буквою s малой и т. п.

2. Правописание иностранных имен и фамилий в русской передаче принято чисто фонетическим, ради возможного приближения к действительному иностранному их выговору. Напр., вместо обычно до сих пор распространенной транскрипции Гельмгольц принято написание Хельмхольц, вместо Максвелль принята транскрипция Мексуел, вместо Клаузиус—Кляузиус и т. п. Мне кажется, что пора уже переходить к такой русской передаче имен, следуя примеру замены когда-то встречавшейся транскрипции Невтон нормальным именем знаменитого Ньютона. Во всяком случае, наряду с таким указанием русского произношения фамилий, всюду оно сопровождается в скобках приведением и иностранной их транскрипции.

3. Некоторую вольностью является также устранение, во многих случаях, удвоения одинаковых согласных, по почину проявляющихся все больше и больше в этом отношении общих тенденций. Так, принято одиночное ϕ в словах дифференциал, коэффициент, одиночное c в конце слова абсциса. К сожалению, это упрощение не удалось провести с надлежащей полнотой, считаясь с некоторыми слишком пока укоренившимися привычками.

4. Для многих часто встречающихся, так сказать—привычных, слов принято сокращенное их написание; напр., выражение „дифференциальное уравнение“ пишется коротко „диф-ное ур-ие“. Впрочем,