

А.М. Архаров

# ОСНОВЫ КРИОЛОГИИ

ЭНТРОПИЙНО-  
СТАТИСТИЧЕСКИЙ  
АНАЛИЗ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ  
СИСТЕМ

Издательство МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

УДК 621.59(075.8)

ББК 31.392

А87

*Рецензент – чл.-кор. РАН, профессор МГМУ Б.Г. Покусаев*

**А.М. Архаров**

А87 Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем / А. М. Архаров. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 507, [5] с.: ил.

ISBN 978-5-7038-3842-6

В работе рассмотрены основные этапы развития инженерной криологии; термодинамические принципы и предельные соотношения для непрямых, непрерывных, обратимых (равновесных) взаимных преобразований теплоты и работы (электроэнергии); термодинамическая температура, единое термодинамическое температурное пространство, холод и теплота; окружающая среда, ее температура и свойства; тепловые двигатели – генераторы работы (электроэнергии); холодильные и криогенные установки и системы – генераторы холода; тепловые насосы – генераторы высокопотенциальной теплоты; «холодные» двигатели – генераторы работы; различные преобразования потоков только теплоты; пример преобразования теплоты высокого потенциала в холод; энтропия и эксергия; внутренняя энергия и энтальпия; свободная энергия и свободная энтальпия; классические технологические задачи инженерной криологии.

Проанализированы принципиальные схемы реальных машинных систем, осуществляющих не прямые, непрерывные, циклические процессы для генерации работы (энергии), холода и теплоты; энергетические и энтропийные балансы реальных систем; истоки энтропийно-статистического метода анализа низкотемпературных систем и определения энергетических потерь; теоретические величины энергетических потерь в циклах НТУ; величины производства энтропии и действительно затрачиваемой работы для компенсации необратимости рабочих процессов и циклов в НТУ.

Показаны характерные особенности реальных необратимых рабочих процессов низкотемпературных систем – генераторов холода; особенности одноразового (кратковременного) и непрерывного (длительного) охлаждения; сформулирована теорема о холодопроизводительности низкотемпературных циклов с потоками рабочего тела. Описаны газовые интегрированные циклы тепловых насосов для одновременной генерации тепла и холода. Приведены примеры энтропийно-статистического анализа различных низкотемпературных систем.

УДК 621.59(075.8)

ББК 31.392

© Архаров А.М., 2014

Оформление. Издательство

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014

ISBN 978-5-7038-3842-6

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие. . . . .	7
Введение: ретроспективный беглый взгляд на проблему холода и теплоты из XXI века. . . . .	14
<b>Глава I. Достижения и этапы развития инженерной криологии . . . . .</b>	<b>20</b>
1.1. Роль и значение низких температур. Области современной криологии. Мировые достижения. Улучшение качества жизни. Некоторые важные работы, выполненные в последние годы в России. Инженерная криология на рубеже веков . . . . .	20
1.2. Анализ исторического опыта создания отечественной крупнотоннажной криоиндустрии . . . . .	45
<b>Глава II. Термодинамические принципы и предельные соотношения для непрямых, непрерывных, обратимых (равновесных) взаимных преобразований теплоты и работы (электроэнергии) . . . . .</b>	<b>59</b>
2.1. Термодинамическая температура. Единое термодинамическое температурное пространство. Холод и теплота . . . . .	59
2.2. Окружающая среда, ее температура и свойства . . . . .	64
2.3. Тепловые двигатели: генераторы работы (электроэнергии) . . . . .	66
2.4. Холодильные и криогенные установки и системы: генераторы холода. . . . .	68
2.5. Тепловые насосы – генераторы высокопотенциальной теплоты . . . . .	70
2.6. «Холодные» двигатели – генераторы работы . . . . .	71
2.7. Различные преобразования потоков только теплоты. Пример преобразования теплоты высокого потенциала в холод . . . . .	72
2.8. Энтропия. Эксергия теплоты. . . . .	74
2.9. Внутренняя энергия и энтальпия. Свободная энергия и свободная энтальпия. Эксергия потока. . . . .	86
2.10. Силы воздействия потоков веществ и изменение импульса . . . . .	92
<b>Глава III. Классические технологические задачи инженерной криологии и теоретически минимально необходимая энергия для их осуществления . . . . .</b>	<b>96</b>
3.1. Охлаждение (при $p = \text{const}$ и $v = \text{const}$ ) . . . . .	96
3.2. Криостатирование (при $T_x = \text{const}$ ) . . . . .	97
3.3. Конденсация веществ из паровой фазы в жидкое или твердое состояние . . . . .	100
3.4. Ожижение, отвердевание и вымораживание газов . . . . .	100
3.5. Разделение и очистка газов и газовых смесей. . . . .	102
3.6. Перенос теплоты на более высокий температурный уровень. (Тепловые насосы. Динамическое отопление) . . . . .	103

<b>ГЛАВА IV. Принципиальные схемы реальных машинных систем, осуществляющих не прямые, непрерывные, циклические процессы для генерации работы (энергии), холода и теплоты. Энергетические и энтропийные балансы реальных систем. Источники энтропийно-статистического метода определения энергетических потерь</b> . . . . .	106
4.1. Высокотемпературный тепловой двигатель – генератор работы. . . . .	106
4.2. Низкотемпературная машинная система – генератор холода. . . . .	107
4.3. Высокотемпературная пароконденсационная машинная система для генерации теплоты – тепловой насос . . . . .	110
4.4. Универсальная машинная система – тепловой насос с газовым циклом для генерации теплоты и холода. . . . .	111
4.5. Низкотемпературный («холодный») двигатель – генератор работы . . . . .	113
4.6. Высоко- и низкотемпературная система – генератор холода (за счет высокопотенциальной теплоты). . . . .	115
<b>ГЛАВА V. Реальные величины затрачиваемой или получаемой работы (электроэнергии). Основы приближенного, энтропийно-статистического метода оценки реальных энергетических потерь в низкотемпературных системах и установках</b> . . . . .	119
5.1. Теоретические величины энергетических потерь в циклах НТУ . . . . .	120
5.2. Величины действительно затрачиваемой работы для компенсации необратимости рабочих процессов и циклов в НТУ. . . . .	121
5.3. Энергетические потери, присущие низкотемпературным установкам в целом . . . . .	122
5.4. Основные реальные необратимые процессы НТУ . . . . .	124
5.5. О вычислении действительных величин производства энтропии . . . . .	126
5.6. Стадии термодинамического анализа НТУ . . . . .	127
<b>ГЛАВА VI. Характерные особенности рабочих процессов низкотемпературных систем – генераторов холода</b> . . . . .	130
6.1. О работе сжатия и расширения в низкотемпературных системах с потоками рабочего тела . . . . .	130
6.2. Изменение основных термодинамических величин при сжатии реального газа . . . . .	142
6.3. Основные процессы, сопровождающиеся понижением температуры в адиабатных условиях или поглощением теплоты в изотермических условиях . . . . .	144
6.4. Понятие о холодопроизводящих процессах в циклах низкотемпературных установок. . . . .	145
<b>ГЛАВА VII. Термодинамический анализ наиболее часто реализуемых процессов, сопровождающихся понижением температуры</b> . . . . .	147
7.1. Процесс $h = \text{const}$ . Дросселирование газов, паров и жидкостей в открытой системе . . . . .	147

7.2. Процесс $U = \text{const}$ . («Дросселирование» в закрытой системе) . . .	165
7.3. Процесс $s = \text{const}$ . Равновесное адиабатное расширение потока вещества. Расширение газов, паров и жидкостей в детандерах – детандирование . . . . .	168
7.4. Процесс $\alpha_{sH} = \text{const}$ . Выхлоп или свободный выпуск газа из баллона. Процесс впуска. . . . .	179
7.5. Процессы в адиабатной системе с переменной массой. . . . .	186
7.6. Расширение газа в адиабатной вихревой трубе Ранка – Хилша . . . . .	188
7.7. Процессы волнового расширения газа. . . . .	194
7.8. Адиабатная откачка паров кипящей жидкости. Адиабатное барботирование ненасыщенных газов через жидкость . . . . .	201
7.9. Процессы охлаждения, основанные на использовании свойств ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{He}$ . . . . .	211
7.10. Процессы охлаждения с использованием рабочих тел в твердом состоянии . . . . .	218
7.11. Электрокалорический эффект охлаждения. Термомагнитное охлаждение. Намагничивание сверхпроводников. Механокалорический эффект. Охлаждение смещением. Деформация упругой среды . . . . .	237
<b>Глава VIII. Одноразовое (кратковременное) и непрерывное (длительное) охлаждение . . . . .</b>	<b>247</b>
8.1. Принципы и способы одноразового (кратковременного) охлаждения. . . . .	247
8.2. Принципы организации непрерывного (длительного) охлаждения. . . . .	250
<b>Глава IX. Генерация холода в низкотемпературных циклах . . . . .</b>	<b>254</b>
9.1. Рабочие тела низкотемпературных систем . . . . .	254
9.2. Основные вопросы организации циклов. Характерные рабочие процессы генераторов холода. Холодопроизводящие процессы в циклах низкотемпературных установок . . . . .	257
9.3. Теорема о холодопроизводительности различных циклов с потоками рабочего тела. Условные понятия «полезной» холодопроизводительности и «потерь» холодопроизводительности. Баланс реально генерируемой (вырабатываемой) и затрачиваемой (расходуемой) холодопроизводительности . . . . .	266
<b>Глава X. Особенности классических циклов низкотемпературных установок . . . . .</b>	<b>273</b>
10.1. Характерные особенности циклов с дросселированием и основные этапы их развития . . . . .	273
10.2. Циклы с детандированием и основные этапы их развития . . . . .	277
10.3. Сравнение параметров и характеристик классических детандерных циклов низкого, среднего и высокого давления для ожигения воздуха. . . . .	283
10.4. Рефрижераторные циклы на основе процесса выхлопа . . . . .	292

<b>Глава XI. Газовые циклы</b> .....	296
11.1. Газовые интегрированные циклы тепловых насосов для одновременной генерации тепла и холода. ....	296
11.2. Цикл с «горячим» рекуператором .....	297
11.3. Цикл с «холодным» рекуператором .....	299
11.4. Цикл с общим «горяче-холодным» рекуператором. ....	301
11.5. Цикл без рекуператора .....	303
11.6. Однопоточный каскадный цикл А.П. Клименко .....	305
11.7. Циклы поршневых газовых холодильных машин и pulsa- ционных криогенераторов (обратные холодильные циклы Стирлин- га и Эриксона, циклы Гиффорда – Мак-Магона, циклы пульсацион- ных криогенераторов, цикл Вюлемье – Такониса) .....	307
<b>Глава XII. Применение энтропийно-статистического метода термодинамического анализа для исследования различных про- цессов и циклов низкотемпературных систем и установок с по- токами рабочего тела</b> .....	342
12.1. Примеры нелогичности и нецелесообразности применения эксергетического варианта термодинамического анализа для ис- следования низкотемпературных процессов. ....	343
12.2. Исследование классического цикла парокompрессионной холодильной машины. Термодинамический анализ фреонового (R22) рефрижераторного цикла .....	348
12.3. Исследование классического цикла высокого давления (Лин- де – Хемпсона) для ожижения воздуха .....	356
12.4. Исследование цикла среднего давления с детандером Ж. Клода для ожижения воздуха. ....	360
12.5. Исследование цикла высокого давления с детандером П. Гейландта для ожижения воздуха .....	371
12.6. Анализ воздушного рефрижераторного рекуперативного цикла низкого давления с детандером (обратный цикл Брайтона) .....	383
12.7. Энтропийно-статистический анализ воздушного рекупера- тивного цикла низкого давления с детандером для ожижения воз- духа (цикл П.Л. Капицы). ....	392
12.8. Энтропийно-статистический анализ установок сжижения природного газа малой производительности .....	409
12.9. Энтропийно-статистический анализ классических холо- дильных циклов для систем кондиционирования воздуха. ....	452
12.10. Аккумулирование холода, как способ энергосбережения и оптимизации энергопотребления .....	468
12.11. Анализ воздушного интегрированного цикла для одно- временной генерации тепла и холода. ....	487
<b>Приложение</b> .....	497