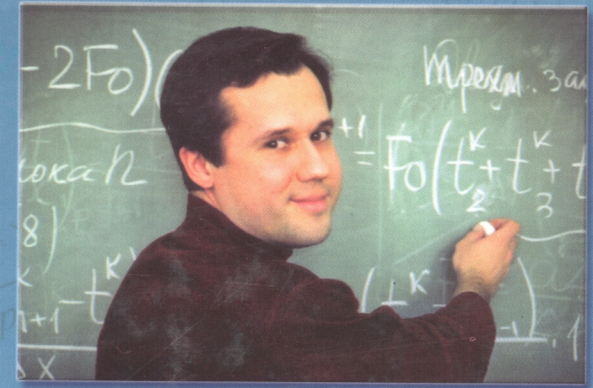
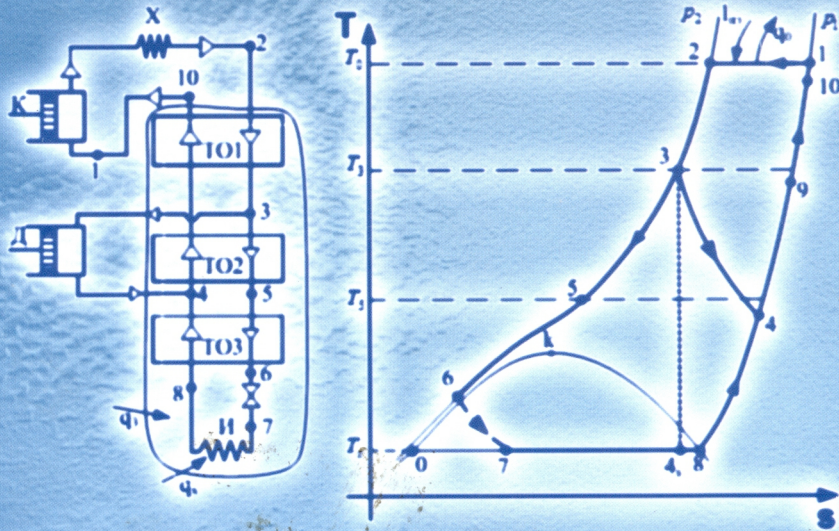


С. Ю. ВАСЮТИНСКИЙ

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ

(основные процессы и циклы)

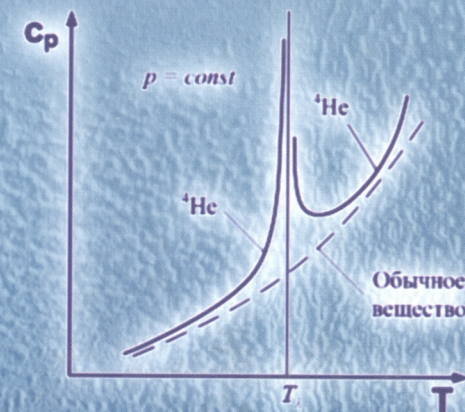


**ВАСЮТИНСКИЙ Сергей Юрьевич** —

кандидат технических наук, доцент  
кафедры криогенной техники

Одесской государственной академии холода,  
член-корреспондент Украинского отделения  
Международной академии холода.

Основные направления научной деятельности:  
теория и расчет тепломассообмена  
в аппаратах низкотемпературной техники;  
проблемы комплексного разделения воздуха  
для получения технических газов.



$$dq = Tds$$

$$\alpha_s = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)$$

$$\lim_{T \rightarrow 0} \Delta s = 0$$

$$du = dq - a$$

С. Ю. ВАСЮТИНСКИЙ

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ

(основные процессы и циклы)

Учебное пособие  
для вузов

Одесса

«Астропринт»

2011

ББК 22.368.3  
УДК 621.59:536.483  
**В 10**

Автор

*Сергей Юрьевич Васютинский*, канд. техн. наук, доцент кафедры криогенной техники Одесской государственной академии холода

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *А. А. Вассерман*;

д-р техн. наук, проф. *В. В. Осокин*;

канд. техн. наук, доц. *А. С. Титлов*

Рекомендовано методической комиссией направления подготовки «Энергетика» научно-методического совета Одесской государственной академии холода.

Протокол № 32 от 23.04.2009 г.

**Васютинский, С. Ю.**

**В 19** Теоретические основы криогенной техники : учебное пособие для вузов / С. Ю. Васютинский. — Одесса : Астропринт, 2011. — 240 с. : ил.

ISBN 978-966-190-210-6

Описаны основные термодинамические законы, составляющие базис криогенной техники, даны определения основных понятий и терминов. Рассмотрено равновесие и фазовые переходы для чистых веществ и для бинарных смесей, уравнение состояния идеального газа, а также несколько базовых уравнений реального газа, в частности, уравнение Ван-дер-Ваальса. Описаны уникальные свойства двух наиболее интересных веществ — гелия и водорода и многочисленные опыты, проводившиеся с этими веществами. Подробно рассмотрены методы получения низких температур как широко распространенных, таких как дросселирование, детандирование, выхлоп, так и более редких, например, магнитное охлаждение и др. Большое внимание уделено способам получения сверхнизких температур, например, растворению/охлаждению с помощью растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ , адиабатной кристаллизации. В последней главе подробно рассмотрены основные циклы, применяемые в криогенной технике и технике разделения смесей, как дроссельные, так и комбинированные.

ББК 22.368.3

УДК 621.59:536.483

ISBN 978-966-190-210-6

© С. Ю. Васютинский, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	8
Введение .....	11
<b>Глава 1</b> <b>ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ</b> <b>НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ</b> .....	26
1.1. Понятие температуры .....	26
1.2. Установление температурной шкалы. Температурные шкалы в криогенике .....	27
1.3. Тепло и энергия. Первый и второй законы термодинамики .....	35
1.4. Третий закон термодинамики. Принцип недостижимости абсолютного нуля .....	39
1.5. Термодинамическое определение понятий «охлаждение» и «холод» .....	41
1.6. Основы термодинамического анализа .....	44
1.6.1. Формы энергии. Понятие эксергии .....	44
1.6.2. Эксергетическая холодопроизводительность и мощность .....	50
1.7. Основные термодинамические соотношения .....	54
<b>Глава 2</b> <b>РАСЧЕТ СВОЙСТВ КРИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ.</b> <b>УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ</b> .....	59
2.1. Термическое уравнение состояния. Калорические свойства .....	59
2.2. Методы определения термодинамических свойств криогенных веществ .....	61
2.3. Равновесие и фазовые переходы чистых веществ .....	66

2.3.1. Условия равновесия фаз .....	69
2.3.2. Правило фаз Гиббса. Равновесные состояния. Фазовые переходы .....	75
2.4. Равновесие и фазовые переходы бинарных систем .....	76
2.5. Уравнения состояния идеального газа .....	80
2.6. Уравнения состояния реального газа .....	83
2.6.1. Уравнение Ван-дер-Ваальса .....	87
2.6.2. Приведенное уравнение Ван-дер-Ваальса. Закон соответственных состояний .....	99
<b>Глава 3</b> <b>СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ КРИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ</b> .....	101
3.1. Гелий .....	101
3.2. Водород .....	117
3.2.1. Водородная энергетика .....	121
<b>Глава 4</b> <b>ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ</b> <b>ТЕМПЕРАТУР</b> .....	126
4.1. Виды и анализ процессов охлаждения в криогенных установках .....	126
4.2. Необратимое адиабатное расширение без совершения внешней работы (дросселирование) .....	127
4.2.1. Изотермическое дросселирование .....	135
4.2.2. Эффекты дросселирования в $i-T$ диаграмме .....	136
4.3. Обратимое адиабатное расширение с совершением внешней работы (детандирование) .....	137
4.3.1. Теплоемкости $c_p$ и $c_v$ , их определение в тепловых диаграммах. Уравнение Майера .....	141
4.4. Нестационарное неравновесное расширение с совершением внешней работы (выхлоп). Процесс впуска газа .....	144

4.5. Процесс $u = const$ .....	150
4.6. Процессы в адиабатной системе с переменной массой ...	152
4.7. Расширение газа в адиабатной вихревой трубе Ранка — Хилша .....	155
4.8. Волновое расширение газа .....	159
4.9. Откачка паров кипящей жидкости .....	163
4.10. Процессы охлаждения с использованием рабочей среды в твердом состоянии .....	166
4.10.1. Адиабатное размагничивание .....	166
4.10.2. Термоэлектрическое охлаждение .....	177
4.10.3. Десорбционное охлаждение .....	180
4.11. Процессы охлаждения, основанные на использовании свойств ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ .....	181
4.11.1. Охлаждение растворением ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ .....	182
4.11.2. Охлаждение адиабатной кристаллизацией (метод Померанчука) .....	185
4.12. Иные процессы охлаждения .....	188

## Глава 5

ОСНОВНЫЕ ЦИКЛЫ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК .....	193
5.1. Цикл с минимальной работой ожижения .....	193
5.2. Основные термодинамические характеристики для анализа реальных циклов криогенных установок ...	197
5.3. Дроссельные циклы криогенных установок .....	200
5.3.1. Цикл с однократным дросселированием (цикл Линде — Хемпсона) .....	200
5.3.1.1. Оптимальные режимы работы цикла Линде .....	205
5.3.1.2. Потери холода в циклах криогенных установок .....	209

5.3.2. Цикл с однократным дросселированием и промежуточным охлаждением (цикл Линде с промежуточным охлаждением) .....	214
5.4. Детандерные циклы криогенных установок .....	218
5.4.1. Простой детандерный регенеративный цикл .....	218
5.4.2. Цикл среднего давления с детандером (цикл Клода) .....	221
5.4.3. Цикл высокого давления с детандером (цикл Гейландта) .....	226
5.4.4. Цикл низкого давления с детандером (цикл Капицы) .....	230
Литература .....	235

## Предисловие

В качестве основы для написания книги были использованы методические материалы курса лекций по дисциплине «Теоретические основы криогенной техники», читаемого автором в течение ряда лет в Одесской государственной академии холода. Толчком к написанию книги явились многочисленные беседы с доц. Лосем В. И., ушедшим от нас в 2006 году. Он всегда и со всеми бескорыстно делился своим богатым педагогическим опытом. Автор глубоко признателен этому замечательному преподавателю, ученому, чуткому и отзывчивому человеку за ценные методические советы по структурному и смысловому наполнению курса «Теоретические основы криогенной техники». Этот курс явился продолжением традиций по изложению основ специальности, заложенных в 70–90-х годах на кафедре криогенных установок ОГАХ под руководством д-ра техн. наук, проф. Лавренченко Г. К., в частности, в курсах «Физика низких температур» и «Теоретические основы криогенной техники». В процессе работы над изданием также были использованы материалы некоторых классических учебников по криогенной технике и термодинамике.

Эта книга, в первую очередь, адресована студентам, обучающимся по специальности 090507 «Криогенная техника и технология». Но автор попытался изложить материал шире, так, чтобы книга могла быть полезна студентам, обучающимся по специальности 090520 «Холодильные машины и установки», а также, по ряду специальностей, связанных с нефтепереработкой и некоторым другим специальностям направления подготовки «Энергомашиностроение». Это учебное пособие может быть полезно инженерам энергетического профиля и тем, кто интересуется развитием криогенной техники.

Для хорошего усвоения материала читатель должен быть знаком с курсами физики, технической термодинамики, тепломассообмена в объеме программ технических вузов.

В данном учебном пособии материал излагается структурно от простого к сложному как в пределах каждой главы, так и в пределах всей книги. Во введении и в первой главе затрагивается развитие криогенной техники и основные понятия, оперируя которыми, можно

вести речь о способах и методах получения низких температур. Вторая глава посвящена такому важному в криогенной технике разделу, как фазовое равновесие и методам его описания и расчета. В третьей главе основное внимание уделено свойствам таких уникальных криогенных веществ, как гелий и водород. Четвертая глава посвящена методам получения низких и сверхнизких температур в криогенной технике, а в пятой главе идет речь об основных циклах, применяемых в технике воздухоразделения, как дроссельных, так и комбинированных. При этом основное внимание уделяется разъяснению физической сущности происходящих процессов. Автор сознательно пытался изложить материал без его излишней математизации, давая возможность читателю сосредоточиться на физической картине того или иного процесса или цикла. Весь текст подробно проиллюстрирован, что дает возможность студенту глубже и быстрее понять сущность явления, процесса, метода или цикла.

С целью облегчения понимания читателями рассматриваемого материала, автор использовал значительное количество примечаний, что кажется полезным, поскольку они отмечают своеобразные вехи для понимания основ и лучшего овладения специальностью в целом. Некоторые примечания выделены в самом тексте разделов более мелким шрифтом, они адресованы тем читателям, кто хотел бы более углубленно понять тот или иной вопрос.

Для удобства читателей материал книги снабжен сквозным для всех глав списком принятых сокращений и развернутым списком использованной литературы, хотя автор и старался сократить его с целью перечислить лишь отдельные широко известные труды и монографии, касающиеся рассмотрения тех или иных вопросов более подробно.

Работа по компьютерной верстке выполнена автором.

Автор выражает глубокую благодарность д-ру техн. наук, проф. В. А. Наеру за редактирование материалов и ценные рекомендации по сути изложения отдельных вопросов. Автор благодарит д-ра техн. наук, проф. А. А. Вассермана, д-ра техн. наук, проф. В. В. Осокина, д-ра техн. наук А. С. Титлова за прочтение рукописи и высказанные замечания.

Автору хотелось бы выразить признательность инж. Ю. И. Тревке за помощь в подготовке иллюстративного материала.

Автор также выражает признательность всему коллективу кафедры криогенной техники Одесской государственной академии холода за советы и поддержку.

Все замечания читателей по содержанию, изложению материала и оформлению книги будут с благодарностью приняты автором.

г. Одесса, 2009 год

С. Ю. Васютинский

## Введение

Криогенная техника — это отрасль техники, связанная с достижением и практическим использованием криогенных температур. Криогеника — это область науки, которая включает в себя исследование, развитие и применение криогенной техники. Слово «криогенный» в переводе с греческого означает «производящий холод», но в настоящее время этим термином определяют не просто процессы, устройства, исследования в области температур ниже температуры окружающей среды, а только лишь такие, которые связаны с получением температур ниже 120 К.

До конца XIX века интерес исследователей к низким температурам носил эпизодический характер, стойкий интерес возник на рубеже веков из-за становившейся все острее проблемы сохранения пищевых продуктов, с одной стороны, и стремлению к познанию мира — с другой. До середины XX века низкие температуры получали в основном при исследовании свойств различных газов, получении их в жидком и твердом состояниях. Большой вклад в решение этих задач внесли в свое время Ф. Бэкон, М. Ломоносов, М. Фарадей, Л. Кайете, Р. Пикте, К. Линде, Дж. Дьюар, Ж. Клод, Г. Каммерлинг-Оннес, В. Кеезом, П. Капица и другие.

С 50-х годов XX века интерес исследователей коснулся и непосредственно получения сверхнизких температур. В настоящее время в импульсном (кратковременном) режиме получены температуры около  $10^{-8}$  К, в стационарном — около  $10^{-3}$  К. Эти цифры являются результатом того огромного вклада в криогенику, который внесли В. Джиок, Д. Мак-Дуггал, Дж. Доунт, Н. Кюрти, Ф. Симон, Б. Негапов, Х. Лондон, Г. Померанчук, Ю. Ануфриев, О. Лаунасама. Наиболее высокие температуры, полученные в стационарном режиме на Земле в лабораторных условиях, составляют 6000 К. Относительная величина полученных температур к температуре окружающей среды достигает 20 (6000 / 300), а относительная величина по низким температурам даже в стационарном режиме 300000 (300 /  $10^{-3}$ ). Это демонстрирует не только впечатляющие достижения криогеники, но и глубину мира низких температур. История низкотемпературной техники началась

в XVIII веке, именно в то время передовая научная мысль коснулась проблемы охлаждения. Великий русский ученый М. В. Ломоносов в середине XVIII века писал: «Первая и нижняя температурная область начинается от самого нижнего градуса теплоты, или что то же — от наибольшего градуса стужи, который пока не показан. Она оканчивается при температуре начинающегося замерзания воды...»

Значительный вклад в развитие науки о холоде внес М. Фарадей, в первой половине XIX века он оживил и даже перевел в твердое состояние ряд газов (например, аммиак, хлор), используя сжатие и последующее охлаждение с помощью твердого диоксида углерода и спирта под небольшим вакуумом в 25 мм рт. ст. Но максимальное давление, которое могли создать исследователи в то время, не превышало 50 МПа, а минимальная температура не была ниже — 110 °С, поэтому водород, азот, кислород, оксид углерода, оксид азота, метан не удалось оживить, эти газы называли «постоянными».

Следующий шаг в развитии криогеники, можно сказать, рождение криогеники как науки состоялось в 1877 году научными трудами двух ученых — Л. Кайете и Р. Пикте. Луи-Поль Кайете (1832–1913) — французский горный инженер, работавший на чугунолитейном заводе. Вначале Кайете исследовал ацетилен, пытаясь его перевести в жидкое состояние. Прибор состоял из толстостенной стеклянной трубки, в которой исследуемый газ сжимался столбиком ртути, на которую, в свою очередь, оказывала давление вода, накачиваемая водяным насосом. Во время одного из опытов еще при давлении, при котором ацетилен не мог быть оживлен, сорвало запорный водяной кран и вода под давлением сжатого газа частично вылилась из установки. Одновременно в трубке появился туман, который Кайете сначала посчитал сконденсировавшимися примесями в ацетилене, например, водой. Повторив «неудачный» опыт с тщательно очищенным ацетиленом, исследователь получил тот же результат — туман в трубке! Кайете понял, что это не примеси, а сам ацетилен оживается при низком давлении. Он открыл метод охлаждения газа при его расширении с отдачей внешней работы, то есть его установка была прообразом детандера, правда, работающим однократно. В конце 1877 года Кайете на этой же установке удалось оживить оксид углерода, кислород, а впоследствии — метан, азот и воздух.

Рауль Пьер Пикте (1846–1929) — швейцарский физик, работал в Женевском университете. В конце 1877 года он, как и Кайете, сообщил об оживлении кислорода. Только для этого он использовал более сложную установку, включающую в себя двухступенчатую каскадную холодильную машину с двумя замкнутыми контурами, работавшими на диоксиде серы  $SO_2$  и диоксиде углерода  $CO_2$  для предварительного охлаждения газа, и дроссельный вентиль. Но ни Л. Кайете, ни Р. Пикте не смогли оживить кислород так, чтобы наблюдать его в виде жидкости при температуре кипения, так как температуры кипения хладагентов в ступенях предварительного охлаждения были недостаточно низкими.

Через 6 лет после описываемых событий, 29 марта 1883 года это удалось сделать двум польским ученым из Краковского университета — З. Вроблевскому и К. Ольшевскому. Зигмунд Вроблевский и Кароль Ольшевский в своей установке отказались и от адиабатного расширения с совершением внешней работы, которое применил Кайете, и от дросселирования, которое применил Пикте, они для оживления кислорода использовали этилен, в свою очередь охлаждавшийся с помощью твердого диоксида углерода и эфира, причем жидкий этилен кипел под вакуумом 1 мм рт. ст. ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  МПа). При теплообмене через стенку сосуда с этиленом с температурой — 152 °С кислород под давлением 2 МПа оживался, что позволило собрать его в сосуд. Эти же ученые, заменив этилен кислородом, оживили воздух, азот и оксид углерода. С октября 1883 года ученые стали работать раздельно. Вроблевский занимался подготовкой экспериментальной и теоретической части для оживления водорода, предсказал достаточно точно его критическую температуру. Ольшевский в 1894 году оживил аргон, а затем перевел его в твердое состояние. Он предпринимал попытки и оживления водорода, но смог лишь наблюдать его туман, расширив его после сжатия до 19 МПа и предварительного охлаждения. Оживить водород и получить его в виде жидкости удалось в 1898 году английскому физiku Джеймсу Дьюару. В дальнейшем криогеника стала развиваться по трем направлениям: первое — это стремление как можно ближе подойти к абсолютному нулю, второе — исследовать процессы и свойства веществ, имеющие место в низкотемпературной области, третье — задачи промышленного использования результатов, достигнутых в первых двух направлениях.

Исследователем и инженером, который пошел по третьему пути, был немецкий ученый Карл фон Линде (1842–1934). С 1872 году он работает ординарным профессором в Мюнхенском политехникуме и занимается созданием надежных холодильных машин, например, в 1875 году ему удалось довести до промышленного производства спроектированную им аммиачную компрессорную холодильную машину. Не прекращая заниматься разработкой и производством холодильных машин, Линде начинает в 1890 году исследования с целью создания установок сжижения и разделения воздуха. Он понимал, что методы, которые использовали его предшественники, основанные на однократном использовании охлаждающей смеси и испарительного охлаждения, не годятся для решения поставленных задач, необходимо переходить к непрерывному циклу, подобному тому, который применяется в аммиачных парокомпрессионных холодильных машинах. Идея о каскаде нескольких холодильных машин была им отвергнута, он нашел другое решение, объединив идею Сименса о регенерации с комбинированным компрессорным циклом. В нижней части цикла Линде предложил использовать дроссель и испаритель (или дроссель и сборник жидкости в ожижительном режиме), а в верхней — рекуперативный теплообменник и компрессор с концевым холодильником. С тех пор этот цикл занял прочное положение в криогенной технике и носит имя Линде. Но Линде предложил еще два варианта циклов, которые можно было применить в ожижителях. Прежде всего, это цикл высокого давления с двойным дросселированием и циркуляцией части потока воздуха, он предложен и запатентован ученым в 1895 году. Здесь давление в цикле составляло 20 МПа в основном цикле и 5 МПа во вспомогательном. И, наконец, в 1900 году им был предложен цикл высокого давления с промежуточным охлаждением, где для этого охлаждения использовалась двухступенчатая аммиачная парокомпрессионная холодильная машина, охлаждавшая воздух до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Использование предварительного охлаждения позволило увеличить производительность ожижителя на 60 % (с 5 до 8 л/ч) по сравнению с базовым циклом.

Также в 1895 году получил патент на создание ожижителя воздуха английский инженер Вильям Хемпсон, причем он получил его на две недели раньше, чем К. Линде. Но идеи Линде и Хемпсона отличались. Прежде всего, у Хемпсона в отличие от Линде не было чет-

кого указания на то, каким образом расширять газ в цикле. В этом идея Хемпсона проигрывала идее Линде. Но второе отличие заключалось в конструкциях рекуперативных теплообменников, и здесь идея Хемпсона оказалась лучше: в теплообменнике Линде обратный поток воздуха проходил вдоль трубок в кольцевом зазоре, а в теплообменнике Хемпсона — поперек трубок в межтрубном пространстве. В последнем случае трубки турбулизировали поток, благодаря чему теплообменник Хемпсона был компактнее и легче теплообменника Линде. Исходя из того, что Линде и Хемпсон предложили похожие циклы почти одновременно, иногда регенеративный дроссельный цикл называют именем Линде — Хемпсона.

К. Линде не вступал в дискуссии относительно приоритета заявленных циклов, он сосредоточился на совершенствовании очистки воздуха от вредных для его ожижения примесей, снижении массогабаритных характеристик установок, и главное — на идее разделения воздуха после ожижения, получении кислорода и азота. Различную испаряемость кислорода и азота из жидкого воздуха отметил впервые в 1892 году Д. Дьюар, первую промышленную установку для получения газообразного кислорода первым создал в 1902 году К. Линде. В установке после рекуперативного трехпоточного теплообменника Линде предложил колонну однократной ректификации. В нее воздух попадал через змеевик, дополнительно охлаждаясь и обеспечивая образование в ней пара. После охлаждения жидкий воздух подавался в верхнюю часть колонны, стекая по которой и взаимодействуя с поднимающимся паром, обеспечивал процесс разделения. Таким образом, в кубе накапливался кислород, а из самой верхней точки колонны отводился поток азота с чистотой 89–92 %. Азот и газообразный кислород проходили через рекуперативный теплообменник, отдавая свой холод прямому потоку воздуха. При такой схеме ректификационной колонны в чистом виде можно было получать только кислород, хотя около трети кислорода теряется с отбросным потоком, азот же в чистом виде получить невозможно.

В 1907 году К. Линде предложил колонну двукратной ректификации, которая и сейчас, спустя столетие, применяется во всех промышленных воздухоразделительных установках. Конечно, она была несколько усовершенствована, но основная идея сохранилась:

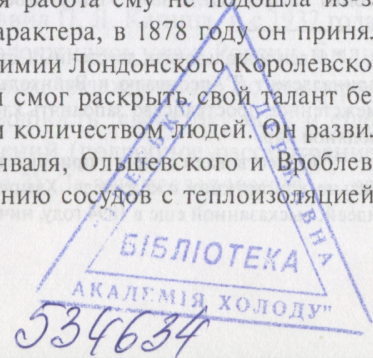
процесс разделения идет в две стадии, сначала в нижней колонне получают чистый жидкий азот и воздух, обогащенный кислородом, затем в верхней колонне получают кислород и газообразный азот. В колонне двукратной ректификации как нагрев, обеспечивающий образование пара, так и конденсация, обеспечивающая наличие жидкости в колонне, реализуются без подвода и отвода тепла извне. Теплообменный аппарат, соединяющий обе колонны и называемый конденсатором-испарителем, служит конденсатором для азота, обеспечивая снабжение жидкостью обеих колонн, и испарителем для кислорода, обеспечивая наличие потока пара в верхней колонне. Только давления должны быть различными: в нижней колонне 0,5–0,6 МПа, в верхней — 0,13–0,15 МПа для обеспечения процесса конденсации. Давление в нижней колонне поддерживается при этом автоматически: если оно понизится, то конденсация прекратится и образовавшийся излишек газообразного азота сам поднимет давление.

Еще одним талантливым ученым и инженером был француз Ж. Клод (1870–1960), он начал заниматься ожижением воздуха с 1896 года. В отличие от К. Линде, который в своих циклах предложил охлаждение газа посредством расширения в дроссельном вентиле, Ж. Клод сделал ставку на расширение с отдачей внешней работы, он предложил детандер. Можно сказать, что Клод явился продолжателем идеи Кайете, только в установке последнего присутствовал детандер как бы однократного действия. Линде утверждал: «Практическое осуществление этого процесса (теоретически неоспоримого) сомнительно...» Причинами же такого мнения было, прежде всего, замерзание влаги углекислого газа и углеводородов, отсутствие смазки, работающей при низких температурах, отсутствие эффективной теплоизоляции для снижения теплопритоков. Клод решил эти задачи за шесть лет, в 1902 году он предложил свой вариант конструкции ожижителя. В своем цикле он после компрессора и рекуперативного теплообменника делил поток на две части: одна направлялась на детандер, где расширялась, снижая свою температуру, другая шла через теплообменник противотоком к детандерному потоку, после чего дросселировалась и сжималась. Производительность установки была 25 л/ч по жидкому воздуху, т. е. больше, чем ожижителя Линде, производительность которого была 8 л/ч. Детандер в цикле Клода выполнял роль

парокомпрессионной холодильной машины в усовершенствованном цикле Линде, но холодильная машина требует затраты энергии на ее функционирование, а детандер, наоборот, возвращает часть работы, затраченной на сжатие. В дальнейшем Ж. Клод и К. Линде использовали в своих установках достижения друг друга: Клод применял колонну двукратной ректификации, а Линде использовал работоспособный детандер, разработанный Клодом. В 1908 году Клод выделил из-под крышки конденсатора-испарителя неон-гелиевую смесь и частично разделил ее низкотемпературной адсорбцией при температуре жидкого воздуха на активированном угле. Линде же в 1915 году создает первую установку для производства, наряду с кислородом, аргона, который производился ректификацией аргоновой фракции, отбираемой из верхней колонны.

В ряду тех, кто внес весомый вклад в криогенную технику, следует отметить двух талантливых немецких изобретателей и инженеров П. Гейландта и М. Френкла. Пауль Гейландт в 1908 году в двадцатилетнем возрасте запатентовал ожижитель воздуха, реализующий тоже дроссельно-детандерный цикл, только, в отличие от Клода, высокого давления. Воздух на детандер отбирался при температуре окружающей среды, что дало возможность смазывать детандер маслом и не изолировать цилиндр детандера. Этот цикл позволил впоследствии создать воздухоразделительные установки, которые превосходили системы Клода по эффективности. М. Френкл в 1925 году подал заявку на воздухоразделительную установку с переключающимися регенераторами с металлической насадкой. Эти аппараты предназначались как для регенеративного теплообмена, так и для осушки и очистки воздуха в установках.

Среди тех, кто внес значительный вклад в криогенную технику, следует упомянуть английского физика и химика Джеймса Дьюара (1842–1923). Он преподавал в Эдинбургском, затем в Кембриджском университете, но преподавательская работа ему не подошла из-за нетерпеливости и вспыльчивости характера, в 1878 году он принял приглашение заведовать кафедрой химии Лондонского Королевского института. Здесь исследователь и смог раскрыть свой талант без необходимости общаться с большим количеством людей. Он развил идеи французского физика Д'Арсонваля, Ольшевского и Вроблевского, Вайнхольда по конструированию сосудов с теплоизоляцией,



правда, присвоив все заслуги себе\*. Но впоследствии Д. Дьюар внес два очень важных усовершенствования в конструкцию сосуда: сначала он предложил серебрить внутренние стенки сосудов для сокращения количества тепла, передаваемого излучением, затем — помещать в вакуумное пространство между двумя сосудами активированный уголь для поглощения небольших количеств воздуха, которые могли с течением времени туда проникнуть. С тех пор сосуды для хранения жидких криогенных продуктов называются его именем. Еще одним значительным достижением Д. Дьюара было ожижение водорода, в 1898 году ему удалось получить 20 см<sup>3</sup> жидкого водорода. Для этого он воспользовался схемой ожижителя Линде, для предварительного охлаждения водорода он воспользовался азотом, кипящим под вакуумом\*\*. В 1899 году Д. Дьюар получил и твердый водород откачкой его паров.

Еще одним ученым, внесшим весомый вклад в криогенную технику, был голландский ученый Гейке Каммерлинг-Оннес (1853–1926). В 1882 году он, став профессором Лейденского университета, во главе группы молодых ученых занялся изучением свойств реальных газов на основе теории Ван-дер-Ваальса. Затем, используя имевшийся у него талант организатора науки, организовал при университете большую криогенную лабораторию. Современники отмечали открытость, гостеприимство, высокие нравственные качества Каммерлинг-Оннеса, он умел сплотить коллектив единомышленников для достижения общей цели. В 1906 году он получил жидкий водород, в отличие от Дьюара, в полупромышленной установке, ее производительность была 4 л/ч. Но первым крупным достижением Г. Каммерлинг-Оннеса явилось создание гелиевого ожижителя и ожижение гелия. Этот ожижитель представлял собой большую систему каскадного типа, основанную на последовательном включении шести ступеней, работающих по циклу Линде на соответствующем рабочем теле. В установке были хлорметиловая, этиленовая, кислородная, азотная, водородная

\* Идея использовать двустенный стеклянный сосуд с вакуумом между стенками принадлежит Д'Арсонвалю и Вайнхольду. Ольшевский и Вроблевский предложили межстенное пространство заполнять хлористым кальцием, который поглощал в нем водяной пар.

\*\* Существовали споры о приоритете между Д. Дьюаром и В. Хемпсоном относительно конструкции ожижителя. Хемпсон утверждал, что Дьюар воспользовался его идеей, высказанной еще в 1894 году, ничего не упомянув об этом.

и гелиевая ступень. Гелий после прохождения водородной системы предварительного охлаждения проходил через рекуперативный теплообменник и дросселировался в сборник жидкости. Часть гелия, которая не ожижилась, возвращалась через теплообменник, охлаждая прямой поток. Была организована предварительная очистка гелия и водорода от вымерзающих примесей, которые, например, не дали возможность Дьюару получить значительное количество жидкого водорода. На этой установке 10 июля 1908 года получено 60 см<sup>3</sup> жидкого гелия. Тут же была предпринята попытка получить и твердый гелий откачкой его паров при давлении 0,001 МПа, но она окончилась неудачей, хотя при этом была достигнута рекордная для того времени температура около 1 К. Причина же неудачи по получению твердого гелия откачкой его паров заключалась в том, что у гелия отсутствует тройная точка и для получения его в твердом виде нужно снижать температуру и повышать давление до 2,5 МПа.

Г. Каммерлинг-Оннес продолжал исследования гелия и в 1911 году он обнаружил, что при температуре жидкого гелия некоторые металлы полностью «...скачком теряют электрическое сопротивление...» и становятся «сверхпроводниками». Это явление было названо сверхпроводимостью, и за это открытие в 1913 году Г. Каммерлинг-Оннес был удостоен Нобелевской премии по физике. В последние годы жизни Каммерлинг-Оннес сделал много для международного сотрудничества, он был одним из организаторов Международного института холода.

Продолжил работы Каммерлинг-Оннеса замечательный российский физик Петр Леонидович Капица (1894–1984). В начале своей научной деятельности, в Кембридже, в лаборатории тогда всемирно известного английского физика Э. Резерфорда он занимался созданием и использованием сильных магнитных полей, затем — исследованиями в области жидкого гелия, в 1934 году он создал первый гелиевый поршневой детандер. В 1935 году в Москве был создан Институт физических проблем, который возглавил П. Л. Капица, и с 1937 года исследования по жидкому гелию продолжились уже в России. Были открыты такие свойства жидкого гелия, охлажденного до температуры ниже 2 К, как сверхтеплопроводность, сверхтекучесть и еще ряд интереснейших эффектов и явлений (подробное рассмотрение этих исследований приведено в главе 3). За эти исследования, «...за

фундаментальные изобретения и открытия в области физики низких температур» П. Л. Капице в 1978 году была присуждена Нобелевская премия по физике.

Параллельно с исследованиями свойств жидкого гелия в лабораториях Института физических проблем под руководством П. Л. Капицы с 1937 года шла работа по созданию высокоэффективных циклов для ожижения воздуха и производства кислорода. Уже в начале 1939 года был предложен цикл низкого давления, который получил имя Капицы, а в настоящее время по этому циклу работает большинство воздуходелительных установок в мире. Для создания этого цикла П. Л. Капице пришлось сконструировать турбодетандер, который имел очень высокий изэнтропный КПД — до 83 %. Преимуществами цикла явились: использование турбомашин, что повысило надежность и увеличило производительность установки, использование регенераторов вместо системы очистки воздуха и основного теплообменника позволило сократить число аппаратов. В цикле Капицы воздух отводился на детандер на самом нижнем температурном уровне так, чтобы в конце расширения он был близок к температуре конденсации и имел ту же температуру, что и пар, возвращающийся из сборника жидкости (более подробно об этом — в главе 5).

В 1877 году усилиями Л. Кальете и Р. Пикте были достигнуты температуры около 90 К. Этот год считают временем зарождения криогеники как составной части науки о холоде. С тех пор прошло почти 130 лет, за это время человечество далеко продвинулось по пути познания мира низких температур. Этот мир обладает уникальными возможностями: при криогенных температурах мы встречаемся с новыми физическими явлениями и фактами, которые помогают проникать в суть строения материи, позволяют использовать новые методы исследования, осуществлять принципиально новые технологические процессы. Например, открытие космической эры в 1957 году расширило представления человечества о ближнем и дальнем космическом пространстве. К середине прошлого века криогенная техника вышла за стены лабораторий, и в наше время ее применение является важным направлением технического прогресса в самых разных отраслях народного хозяйства. Metallургия и химия, энергетика и электроника, ракетная техника и медицина, биология и космонавтика, ядерная

физика и техника эксперимента все больше используют криогенное оборудование и продукты.

В настоящее время практическое использование имеют низкие температуры, начиная с 0,3 К, ведь именно до таких температур необходимо охладить чувствительные элементы космических радиотелескопов. Диапазон от 0,3 до 165 К связан с практическим использованием многих промышленных газов (рис. В.1), которые широко применяются в металлургической и химической промышленности, авиации, ракетостроении, оборонной промышленности, биологии, медицине, электронике, строительстве, энергетике. В этом же температурном диапазоне лежат решения многих задач по криостатированию, применению микрокриогенной техники. В последнее время значительно расширился диапазон температур, используемых для хранения биоматериалов, продуктов питания.

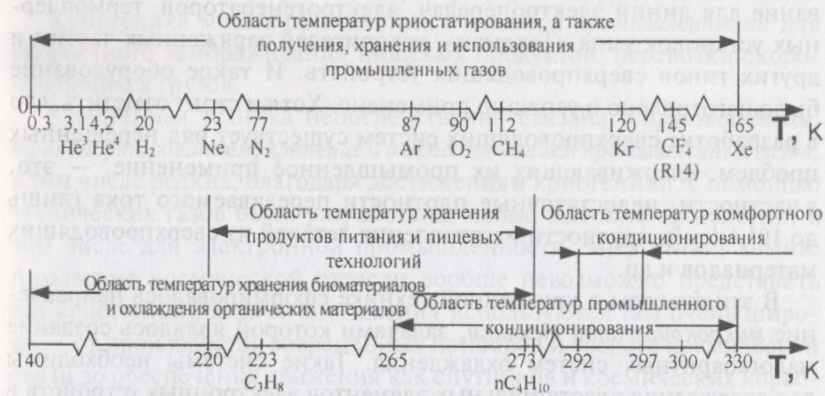


Рис. В.1. Области практического использования низких температур

За последние 40 лет намечился значительный прирост производства основных технических газов: кислорода — более чем в 5 раз, азота — более чем в 40 раз, аргона — более чем в 7 раз. В несколько раз за последнее десятилетие возросло производство редких газов — гелия, неона, криптона, ксенона. На особом месте в ряду этих газов стоит гелий, ведь развитие гелиевой техники отмечено шестью Нобелевскими премиями (У. Рамзай — 1904 г., Г. Каммерлинг-Оннес — 1913 г., Л. Ландау — 1962 г., Л. Альварес — 1968 г., Дж. Бардин — 1972 г.,

П. Капица — 1978 г.). Значительный вклад в создание гелиевой промышленности, использование сверхпроводимости в энергетике, в том числе в работы по созданию сверхпроводящих магнитов, сквидов, магнитных томографов, внесли И. А. Глебов, Н. А. Доллежал, А. Е. Шейндлин, А. П. Александров, В. П. Беляков.

Работы по *использованию сверхпроводимости* начались в мире с 60-х годов XX века. Применение сверхпроводящих устройств открывало возможности для увеличения эффективности и удельной мощности электротехнического и энергетического оборудования, а также уменьшения его массогабаритных характеристик. Для достижения этих целей необходимо было не только увеличить выпуск ставшего привычным криогенного оборудования, такого, как сосуды, резервуары, газификационные установки, криогенные гелиевые установки, но и создать специализированное уникальное оборудование для линий электропередач, электрогенераторов, термоядерных установок типа «Токамак», ускорителей заряженных частиц и других типов сверхпроводящих устройств. И такое оборудование было изготовлено и успешно применено. Хотя и стоит отметить, что в разработке сверхпроводящих систем существует ряд нерешенных проблем, сдерживающих их промышленное применение, — это, в частности, недостаточные плотности передаваемого тока (лишь до  $10^4$  А/см<sup>2</sup>), трудности изготовления деталей из сверхпроводящих материалов и др.

В эти же годы в криогенной технике сформировалось направление *микробиогенной техники*, задачами которой являлось создание малогабаритных систем охлаждения. Такие системы необходимы для охлаждения чувствительных элементов электронных устройств в авиации, космонавтике, системах дальней связи. Были разработаны микробиогенные системы, различающиеся как по принципу получения холода, фазовому состоянию и составу хладагентов, так и по температурному уровню, холодопроизводительности и другим параметрам.

Криогеника уже достаточно давно нашла широкое применение в *биологии и медицине*. Для консервации и длительного хранения крови и ее составляющих, костного мозга, тканей применяются криогенные технологии. Более высоких температур, представляющих уже область умеренного холода, для последующего возобновления

их функций при отогреве, требуют сложные биологические объекты (например, печень и почки).

С 70-х годов криогеника применяется в медицине для проведения криохирургических операций, что позволяет ускорить заживление раны и сократить послеоперационный период, а также для проведения криодеструкции новообразований (после нагрева соответствующей области до 42 °С токами СВЧ). С недавнего времени стала развиваться криотерапия, в частности, применяются криосауны с азотными температурами (–180 ... –130 °С) для реабилитации человека после ряда заболеваний (инсульта, инфаркта), лечения псориаза, бронхиальной астмы и вообще для активизации внутренних защитных сил организма.

Решение всех этих задач потребовало создания специального оборудования, такого, например, как аппараты программного замораживания, криогенные сосуды и резервуары, криохирургические зонды.

Криогеника может применяться в *пищевой промышленности* для скоростного замораживания пищевых продуктов, перевозки скоропортящихся грузов.

Криогенная техника непосредственно связана с *производством, транспортированием, хранением и использованием промышленных газов*, в том числе редких, благодаря достижениям криогеники, с помощью технических газов были разработаны новые высокие технологии, в том числе для электронной промышленности, энергетике, химии. Развитие космической отрасли вообще невозможно представить без криогеники, ведь ее достижения используются там очень широко — от производства современных приборов и средств космической связи до обеспечения движения как спутников и космических кораблей, так и ракет-носителей.

Криогенная техника может помочь также и в решении *энергетической проблемы*. Сейчас внимание мирового сообщества обращено на поиски замены традиционным видам топлива: нефти, угля, природного газа. Одной из возможностей замены является использование водорода. С начала эры освоения космоса жидкий водород используется в качестве горючего для ракет-носителей. Это высококалорийное и экологически чистое топливо, ведь продуктом его сгорания является вода. Уже сейчас жидкий водород применяется в опытных образцах автотранспорта, возможно его применение в авиации и дру-

гих отраслях. В последнее время появились и новые области применения криогенной техники в энергетике, в числе которых создание и доведение до промышленного использования экологически более чистых термоядерных реакторов на  $\text{He}^3$ , применение жидкого метана в авиации, очистка воздуха от радиоактивных продуктов с помощью адсорбции и ректификации при переработке отходов ядерных топлив (например,  $\text{Kг-85}$ ). Кроме того, в настоящее время ведутся работы по исследованию новых поколений энергетических и транспортных установок, реализующих принципиально новые модели силовых взаимодействий.

Бурное развитие цивилизации на нашей планете поставило на передний план проблему защиты окружающей среды, которая с каждым годом становится все острее. Не вызывает сомнений, что в этой связи роль ряда промышленных газов, таких, как метан, водород, гелий, пропан, бутан, озон, неон, будет неуклонно возрастать и криогенная техника может внести вклад в дело защиты среды обитания человека.

Криогеника имеет прямое отношение к производству озона, с помощью которого можно решить *проблему очистки сточных вод* путем их озонирования.

Достижения криогеники используются для *очистки вредных газовых выбросов*, в частности, для низкотемпературной конденсации аммиака, оксидов азота, углерода, низкотемпературной сорбции вредных примесей, десублимации примесей в условиях низких температур.

Криогенная техника может внести свой вклад и в дело *защиты человека от радиоактивного поражения* путем ограничения распространения зоны заражения охлаждением зоны аварии до азотных температур (такие технологии применялись для ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС).

Криогеника применяется для *переработки отходов*, например, в 70-е годы в Харькове во ФТИНТе была разработана криогенная технология переработки старых автопокрышек, позднее несколько усовершенствованная в МГТУ им. Баумана. Она заключается в том, что специально обработанные покрышки охлаждаются до криогенных температур, а затем с помощью пирозаряда измельчаются. Окончательное измельчение происходит в замкнутых каналах при помощи

специальных решеток-ножей. Полученная резиновая крошка применяется при строительстве и ремонте автомобильных дорог.

Многие достижения криогенной техники открыли принципиально новые возможности в энергетике и медицине, электронике и биологии, химии и физике. Криогенная техника используется в самых различных отраслях современного производства. Криогеника стала средством для создания новых способов получения энергии, материалов и технологий, необходимых человеку. Со всей определенностью можно сказать, что по мере усовершенствования техники и технологии получения низких температур, по мере развития существующих и открытия новых способов получения холода роль криогенной техники будет неуклонно возрастать.