

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Предисловие . . . . .                                                                                                  | 3         |
| Введение . . . . .                                                                                                     | 5         |
| <b>Глава первая. Способы получения низких температур</b>                                                               | <b>11</b> |
| 1. Общие сведения. Теплофизические свойства некоторых криоагентов . . . . .                                            | 11        |
| 2. Испарительное охлаждение жидкостей . . . . .                                                                        | 14        |
| 3. Охлаждение газов и жидкостей при дросселировании . . . . .                                                          | 19        |
| 4. Расширение газов с совершением внешней работы . . . . .                                                             | 25        |
| 5. Охлаждение газов при истечении из постоянного объема . . . . .                                                      | 31        |
| 6. Другие способы получения низких температур . . . . .                                                                | 34        |
| 7. Использование каскадного охлаждения и регенеративного теплообмена в процессах получения низких температур . . . . . | 38        |
| 8. Разделение газовых смесей методом низкотемпературной ректификации . . . . .                                         | 44        |
| <b>Глава вторая. Вопросы энергетики и экономики получения и поддержания низких температур</b>                          | <b>48</b> |
| 9. Термостатирование при низких температурах . . . . .                                                                 | 48        |
| 10. Ожижение газов . . . . .                                                                                           | 55        |
| 11. Разделение газовых смесей . . . . .                                                                                | 59        |
| 12. Технико-экономические аспекты оптимизации низкотемпературных установок . . . . .                                   | 62        |
| <b>Глава третья. Некоторые особенности оборудования низкотемпературных систем. Теплоизоляция</b>                       | <b>63</b> |
| 13. Особенности оборудования низкотемпературных систем . . . . .                                                       | 63        |
| 14. Роль тепловой изоляции в низкотемпературных системах . . . . .                                                     | 68        |
| 15. Изоляция с помощью материалов, имеющих низкую теплопроводность . . . . .                                           | 70        |
| 16. Использование вакуума для создания высокоэффективной изоляции . . . . .                                            | 73        |
| <b>Глава четвертая. Области применения низких температур</b>                                                           | <b>81</b> |
| 17. Общие сведения . . . . .                                                                                           | 81        |
| 18. Низкотемпературное разделение газовых смесей . . . . .                                                             | 81        |
| 19. Хранение и транспорт газов в сжиженном состоянии . . . . .                                                         | 89        |
| 20. Использование низких температур для изменения свойств материалов и воздействия на биологические объекты . . . . .  | 92        |
| 21. Охлаждение и криостатирование электротехнических устройств . . . . .                                               | 98        |
| 22. Снижение температуры в элементах оптических и радиоэлектронных устройств . . . . .                                 | 111       |
| 23. Использование низких температур для проведения научных исследований . . . . .                                      | 119       |
| 24. Тенденции совершенствования низкотемпературных установок . . . . .                                                 | 121       |
| Список литературы . . . . .                                                                                            | 127       |

ББК 31.392  
Г 78  
УДК 621.59

**Грачев А. Б., Калинин Н. В.**

**Г 78** Получение и использование низких температур.  
М.: Энергоиздат, 1981. — 128 с., ил. — (Б-ка тепло-  
техника).

35 к.

В популярной форме описаны состояние и перспективы развития и использования низкотемпературной техники. Показано, как низкие и ультранизкие температуры применяются в энергетике, космонавтике, радиоэлектронике, на транспорте, в различных технологических процессах и в быту.

Для широкого круга читателей со средним образованием, интересующихся достижениями науки и техники. Она представляет интерес также для преподавателей техникумов и производственно-технических училищ.

**Г 30316-303**  
**Г 051(01)-81** 35-81(Э). 2303050000

**ББК 31.392**

**6П2.28**

**АЛЕКСЕЙ БОРИСОВИЧ ГРАЧЕВ,  
НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ КАЛИНИН  
ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Редактор **Е. И. Микулин**  
Редактор издательства **Н. М. Пеунова**  
Обложка художника **Т. А. Дворецковой**  
Технический редактор **В. В. Хапаева**  
Корректор **Т. Н. Лебедева**  
ИБ № 2629 («Энергия»)

|                                            |                             |                           |
|--------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Сдано в набор 30.12.80                     | Подписано в печать 10.03.81 | T-05825                   |
| Формат 84×108 <sup>1</sup> / <sub>32</sub> | Бумага типографская № 2     | Гарн. шрифта литературная |
| Печать высокая                             | Усл. печ. л. 6,72           | Уч.-изд. л. 7,02          |
| Тираж 15 000 экз.                          | Заказ 1005                  | Цена 35 к.                |

Энергоиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

© Энергоиздат, 1981



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Низкие температуры привлекают к себе постоянно растущее внимание со стороны все более широкого круга специалистов. Этот интерес вызывается тем, что использование низких температур открывает во многих случаях необыкновенные возможности усовершенствования технологических процессов, применения качественно новых материалов и систем, проведения таких физических исследований, которые в принципе не могут быть осуществлены в условиях окружающей среды.

Техника низких температур сформировалась к настоящему времени в самостоятельное научное направление, оказывающее большое влияние на научно-технический прогресс. Это воздействие проявляется в двух аспектах.

Первый из них связан с использованием низких температур для существенного улучшения или интенсификации технологических процессов. Так, традиционное разделение газовых смесей при низких температурах с целью получения больших количеств азота, кислорода, гелия и других веществ остается до настоящего времени одним из самых экономичных способов. В медицине, биологии, пищевой промышленности низкие температуры широко используются для обработки и длительного хранения биологических и пищевых продуктов; в машиностроении все шире применяется низкотемпературная обработка материалов.

Второй аспект связан с тем, что при низких температурах у некоторых веществ открываются такие свойства, как сверхпроводимость, термомагнитный эффект, сверхтекучесть (только для гелия), которые не наблюдаются при температурах окружающей среды. Использование этих свойств позволяет создавать качественно новые, более совершенные системы. Сверхпроводимость веществ при низких температурах все шире начинает использоваться в энергетике, электротехнике, приборостроении и других областях техники.

Развитие техники низких температур поставило перед специалистами задачу упорядочения терминологии. Температуры ниже 120 К стали называться после XIII Конгресса Международного института холода (1971 г.) криогенными, а весь комплекс вопросов, связанных с их получением и использованием, — криогеникой. Слово «криогеника» происходит от двух греческих слов: «криос», которое соответствует русскому «холод», и «генос», что означает «рождение».

Выше температур 120 К лежит область холодильной техники.

В СССР разработаны специальные ГОСТ на термины и определения в области криогенной и холодильной техники.

В предлагаемой читателям книге вопросы получения и использования низких температур рассматриваются в популярной форме. Авторы стремились изложить материал так, чтобы он был легко доступен для понимания читателей, не являющихся специалистами в области техники низких температур. В задачу авторов не входило отразить все направления низкотемпературной техники, а показать только те из них, которые в настоящее время наиболее широко развиты или являются особенно перспективными.

Материал базируется в основном на рассмотрении задач криогенной техники, хотя закономерности, касающиеся получения и некоторых вопросов использования низких температур, несомненно общие для всей низкотемпературной области.

Введение и гл. 1—3 написаны А. Б. Грачевым, гл. 4 — Н. В. Калинин.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность проф. В. М. Бродянскому, проф. Е. И. Микулину и канд. техн. наук Ю. В. Петровскому за полезные советы и замечания, сделанные ими в процессе подготовки рукописи.

*Авторы*

## ВВЕДЕНИЕ

Знаменитый английский писатель-сатирик Дж. Свифт в книге «Путешествия Гулливера», вышедшей в 1726 г., привел такое описание одной из лабораторий Академии в Логодо.

В распоряжении ученого, известного в Академии «под именем универсального искусника», находятся «две большие комнаты, наполненные удивительными диковинами, и пятьдесят помощников. Одни сгущают воздух в вещество сухое и осязаемое ...» [20].

Мог ли сатирик предположить, что высмеиваемая им разработка «бесплодной» идеи когда-либо действительно станет актуальной проблемой, а превращение воздуха в «вещество сухое и осязаемое» окажется не только реальным, но и чрезвычайно необходимым и важным! Удивительное, хотя и сатирическое предсказание. Ведь во времена Свифта не были известны не только способы «сгущения» воздуха, но и его состав.

Прошло немногим более 150 лет, и фантазия обрательлась в реальность. Решающую роль в этом обращении сыграли низкие температуры.

К 1877 г. ученым удалось сконденсировать многие газы. Как будто бы оправдывались высказывания А. Лавуазье и М. В. Ломоносова о возможности перехода веществ в различные агрегатные состояния в зависимости от температуры. И все же шесть из известных к тому времени газов<sup>1</sup> ( $O_2$ ,  $NO$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ), а вместе с ними и воздух ожижены не были. Их так и называли «постоянные газы». Наконец, в декабре 1877 г. почти одновременно С. Кайете во Франции и Р. Пикте в Швейцарии удалось впервые ожигить кислород. В обоих экспериментах была получена всего лишь парожидкостная смесь в виде тумана. Отдельные капельки жидкости, осаждавшиеся на стенках стеклян-

<sup>1</sup> Гелий, аргон и редкие газы в то время еще не были открыты.

ных трубок, тут же испарялись. Предстояло еще сделать главное — произвести накопление и сохранение жидкости. Ни С. Кайете, ни Р. Пикте решить эту проблему не смогли.

Потребовалось еще шесть лет поисков, прежде чем польским исследователям З. Вроблевскому и К. Ольшевскому в 1883 г. удалось собрать небольшое количество жидкого кислорода, азота, воздуха и окиси углерода.

Число постоянных газов стремительно сокращалось. Последним из этой группы был ожижен водород. Его ожижение произвел в 1898 г. Дж. Дьюар.

Казалось, миф о существовании постоянных газов окончательно рухнул. Однако к тому времени стало известно о существовании на Земле еще одного газа — гелия<sup>1</sup>. Этот газ оказался наиболее трудно ожижаемым. Только через 10 лет после получения жидкого водорода был, наконец, ожижен и гелий. Его ожижение произвел Г. Камерлинг-Оннес в Голландии в 1908 г. С получением жидкого гелия была достигнута температура, всего на 4 К отличающаяся от абсолютного нуля. В этом же эксперименте Камерлинг-Оннес попытался получить и твердый гелий. Используя вакуумирование парового пространства над жидкостью, он понизил давление до 0,01 атмосферного. Однако твердый гелий так и не был получен. В то время еще не было известно, что гелий не имеет тройной точки, и его превращение в твердую фазу возможно при давлении не ниже 2,5 МПа (при  $T < 1,5$  К). В 1909 г. Камерлинг-Оннесу удалось еще снизить давление над жидкостью и таким образом достигнуть температуры жидкого гелия сначала в 1,38 К, а затем и в 1,04 К. Дальнейшее понижение температуры было приостановлено тем, что существовавшие в то время вакуум-насосы не позволили создать большее разрежение. Но штурм низких температур продолжался.

Одновременно с получением низких температур начинаются интенсивные исследования свойств веществ в этой необычной области, а также попытки использовать достижения низкотемпературной техники в различных сферах деятельности человека.

Однако известные к тому времени методы получения низких температур все же не могли обеспечить ожиже-

---

<sup>1</sup> Гелий был открыт при исследовании атмосферы Солнца в 1868 г. Отсюда его название от греческого слова «гелиос» — Солнце.

ние газов в количествах, достаточных для их практического применения. Эта задача была успешно решена в 1895 г. одновременно и независимо друг от друга К. Линде в Германии и Хэмпсоном в Англии. Их способ ожижения, основанный на использовании эффекта дросселирования газов в сочетании с регенеративным теплообменом, получил широкое признание благодаря простоте инженерных решений.

Уже через 15 лет после первого успешного ожижения кислорода создаются установки для низкотемпературного разделения воздуха на азот и кислород, а с 20-х годов нашего столетия осуществляется внедрение продуктов разделения в металлургическую, химическую и другие отрасли промышленности. Кислород начинает применяться в медицине и авиации.

В 1903 г. К. Э. Циолковский сделал предположение о том, что кислород найдет широкое применение в качестве окислителя ракетного топлива. Как мы теперь знаем, его предположение полностью сбылось. В настоящее время невозможно себе представить космонавтику без использования таких газов, как кислород, водород, гелий, получение которых непосредственно связано и обеспечивается развитием техники низких температур [22].

Сверхпроводимость веществ при низких температурах, открытая Камерлинг-Оннесом в 1911 г., в настоящее время начинает использоваться для создания электромагнитных систем с сильными магнитными полями. Проблемы создания магнитогидродинамического (МГД) генератора энергии находятся в неразрывной связи с применением сверхпроводящих магнитов. С использованием явления сверхпроводимости разработаны опытные образцы весьма компактных и высокоэффективных электрических машин. Исследуются вопросы применения сверхпроводимости в линиях электропередач [2, 18, 19].

В ряде стран ведутся работы по созданию скоростного наземного транспорта, использующего низкие температуры, причем низкие температуры в этом случае могут быть использованы различно. Применительно к железнодорожному транспорту ведутся работы по созданию скоростных вагонов, «висящих» над рельсами под действием охлаждаемых электромагнитных подвесок. В автомобильном транспорте жидкий водород пред-

полагается использовать в качестве топлива, не загрязняющего окружающую среду. Уже имеются опытные образцы автомашин, работающих на водороде.

Прорабатываются также вопросы использования водородно-кислородного топлива и в авиации [1].

Основные этапы достижений исследований в области низких температур и их практического применения

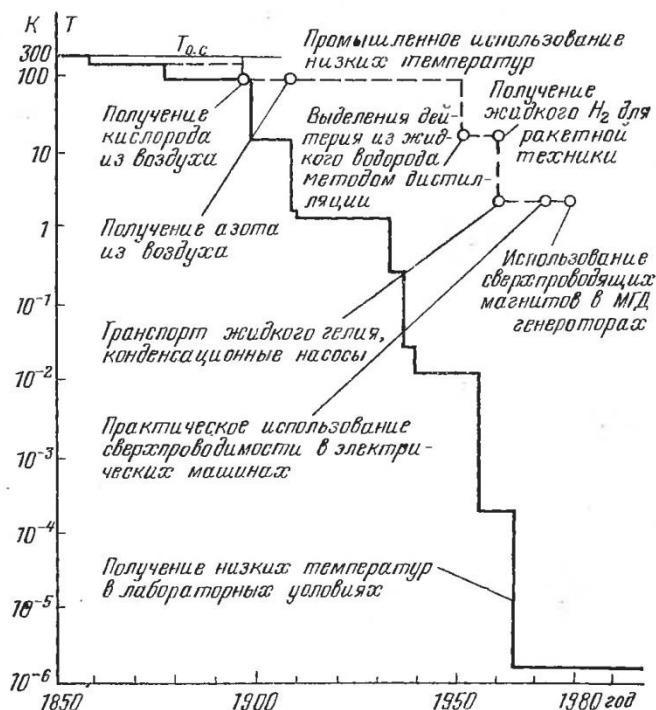


Рис. 1. Этапы освоения низких температур.

показаны на приведенном ниже графике (рис. 1). По оси абсцисс отложены годы лабораторного и промышленного освоения низких температур, по оси ординат — достигнутые температуры.

Из этого графика видно, что рано или поздно успехи в достижении низких температур находят и практическую реализацию. Можно считать, что в настоящее время промышленностью освоены температуры до 1,8 К.

Что же касается более низких температур, то они пока используются на стадии лабораторных исследова-

ний. Но и здесь имеется несомненный прогресс. Еще до недавнего времени эксперименты можно было проводить при стационарных температурах не ниже 0,3 К. Однако с разработкой рефрижераторов, основанных на растворении гелия  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ , криофизики получили возможность проводить исследования при температурах до 0,01 К. Этому в значительной мере способствовали работы советских ученых Б. С. Неганова, В. П. Пешкова и других [1, 12]. Имеются реальные перспективы дальнейшего снижения температурного уровня работы установок для физических исследований. По методу адиабатного сжатия  $^3\text{He}$ , предложенному академиком И. Я. Померанчуком, удастся получить в стационарном режиме температуры до 0,002—0,001 К [1, 12].

Прикладные задачи использования достижений низкотемпературной техники требуют постоянного совершенствования процессов и оборудования для получения низких температур.

С появлением потребности в больших количествах жидкого гелия создаются промышленные установки. Впервые ожижитель гелия, который можно считать прототипом современных промышленных образцов, был создан в 1934 г. акад. П. Л. Капицей, причем схема и конструкция низкотемпературного блока были разработаны настолько удачно, что принципиально они остаются неизменными и до наших дней. Конечно, с дальнейшим ростом производительности ожижителей приходится переходить от поршневых машин к турбомашинам, изменять конструкцию криоблока, но это не изменяет существа дела.

Аналогичная ситуация произошла и с воздухоразделительными установками. Длительное время считалось, что установки для получения азота и кислорода из воздуха наиболее выгодно строить на основе процессов высокого давления.

П. Л. Капицей были убедительно показаны технические преимущества процессов низкого давления, и по разработанной им схеме с турбодетандером была построена первая в мире воздухоразделительная установка низкого давления. Теперь как в нашей стране, так и за рубежом крупные воздухоразделительные установки строят только по схемам низкого давления с использованием турбодетандеров, принципиально мало отличающихся от машин П. Л. Капицы.

С развитием ракетной техники и прикладного использования явления сверхпроводимости появилась потребность в создании крупных водородных и гелиевых ожижителей [22]. Такие установки созданы и успешно работают. В их основе лежат процессы низкого и среднего давления с использованием турбодетандеров [1, 13].

Наряду с развитием крупных криогенных производств в последние годы ведутся интенсивные исследования и разработки микрокриогенных систем различного назначения. Холодопроизводительность таких систем находится в интервале от долей ватта до нескольких ватт.

Строгие ограничения габаритно-массовых характеристик микрокриогенных систем привели, в свою очередь, к созданию нового, более эффективного в условиях их работы оборудования, исследованию специфики работы микрокриогенных установок [6].

Вопросам разработки и применения прогрессивных методов и оборудования с использованием низких температур в нашей стране постоянно уделяется большое внимание. Основными направлениями развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы, принятыми XXV съездом КПСС, предусматривалось, в частности, широкое внедрение кислорода в металлургическое производство. Ставилась также задача ускорения работы по созданию мощных генераторов с использованием принципа сверхпроводимости.

Эти задачи успешно решаются. Несомненно, что и в дальнейшем внедрение низких температур в различные сферы народного хозяйства будет осуществляться ускоренными темпами.

В 1982 г. криогенное машиностроение СССР отмечает свой 50-летний юбилей — дату выпуска первой отечественной воздухоразделительной установки. За короткий период наша страна по уровню развития техники низких температур уверенно вышла на передовые позиции в мире. Достижения отечественной науки и техники в этой области, работы советских ученых получили заслуженное признание как в нашей стране, так и за рубежом.



## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

#### 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ КРИОАГЕНТОВ

Итак, первые успехи в достижении весьма низких температур пришли вместе с покорением «постоянных» газов. Причина столь высокой сопротивляемости этих веществ ожижению заключалась в необычайно низких значениях их критических температур. Так, для конденсации кислорода его температуру необходимо понизить до значения, меньшего чем 154,58 К. Критические температуры азота, водорода, неона и гелия (табл. 1) еще ниже, чем у кислорода, и, следовательно, для их ожижения требуется еще более глубокое охлаждение.

Вот почему так называемые постоянные газы не проявляли (и не могли проявить) признаков ожижения даже при фантастических по тем временам давлениях, превышающих атмосферное в 2—3 тыс. раз, поскольку их сжатие проводилось при температурах выше критических. Наконец, удалось найти способы получения температур, существенно более низких по сравнению с достигнутыми. К тому времени проблема ожижения газов была окончательно решена. Рассмотрению этих способов, позволяющих получить криотемпературы (ниже 120 К), и посвящена настоящая глава. Но сначала несколько замечаний о теплофизических свойствах некоторых *криоагентов*, используемых в технике низких температур.

Криоагентами называются рабочие тела (вещества), используемые в установках для получения температур ниже 120 К. Наибольшее распространение в криогенной технике получили азот, кислород, водород и гелий. Криоагенты применяются в газообразном, жидком и твердом состояниях. Температурные области применения тех или иных веществ определяются в основном их

теплофизическими свойствами. Разумеется, в установках для получения криотемператур криоагенты находятся, как правило, одновременно в различных фазовых состояниях.

В табл. 1 приведены теплофизические свойства некоторых криоагентов.

Для отвода теплоты от охлаждаемого или криостатируемого объекта чаще всего предпочитают использовать охлажденные газы, так как в этом случае достигается наибольшая интенсификация теплообмена. С помощью жидкости легко поддерживать и регулировать температуру криостатирования. Действительно, с изменением давления насыщенного пара (см. табл. 1) меняется и температура кипения жидкости. Таким образом, достаточно сконденсировать газ, а затем поддерживать неизменным давление насыщенного пара, чтобы получить соответствующую постоянную температуру. Регулировать температуру жидкости этим способом можно в диапазоне от критической до температуры тройной точки. Допустимый интервал изменения температуры жидкости зависит от свойства вещества. Общая закономерность для сжиженных газов такова, что с понижением критической температуры вещества умень-

Таблица 1 Теплофизические свойства

| Вещество                                       | Атомная или молекулярная масса | Газовая постоянная, Дж/(кг·К) | Температура кипения жидкости в зависимости от давления насыщенного пара, К |                              |
|------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|                                                |                                |                               | при атмосферном давлении*                                                  | при давлении тройной точки** |
| Азот                                           | 28,013                         | 296,8                         | 77,36                                                                      | 63,15 (0,01253)              |
| Аргон                                          | 39,948                         | 208,2                         | 87,29                                                                      | 83,81 (0,06906)              |
| Водород:                                       |                                |                               |                                                                            |                              |
| нормальный                                     | 2,0159                         | 4124,2                        | 20,38                                                                      | 13,95 (0,0072)               |
| (75% о-Н <sub>2</sub> и 25% р-Н <sub>2</sub> ) |                                |                               |                                                                            |                              |
| параводород                                    | —                              | —                             | 20,2                                                                       | 13,81                        |
| Воздух                                         | 28,96                          | 287                           | 78,8                                                                       | —                            |
| Гелий-4                                        | 4,0026                         | 2078                          | 4,215                                                                      | —                            |
| Гелий-3                                        | 3,0160                         | —                             | 3,191                                                                      | —                            |
| Кислород                                       | 31,998                         | 259,8                         | 90,188                                                                     | 54,352 (0,00015)             |
| Метан                                          | 16,04                          | 518,8                         | 111,67                                                                     | 90,66 (0,0117)               |
| Неон                                           | 20,183                         | 411                           | 27,102                                                                     | 24,54 (0,0433)               |
| Фтор                                           | 37,997                         | 219                           | 84,95                                                                      | 53,48 (0,00025)              |

\* При давлении 0,101325 МПа.

\*\* В скобках указано равновесное давление, МПа.

шается и область существования жидкости. Однако кислород и инертные газы выпадают из этой закономерности. Температуру жидкого кислорода можно изменять (табл. 1) почти на 36 К. Для инертных (Ar, Ne) газов характерна узкая температурная область существования жидкости — всего около 3,5 К. Понижение температуры жидкости уменьшением давления равновесного пара нашло широкое практическое применение.

При давлении в тройной точке и ниже получают криоагент в твердом состоянии.

Криоагенты удобно хранить и транспортировать в конденсированном состоянии. Из табл. 1 видим, что плотность жидкостей в 600—1000 раз больше плотностей соответствующих газов при том же давлении. Поэтому системы для хранения и перевозки жидкостей получаются более компактными и легкими, чем для газообразных веществ.

Часто в тех случаях, когда требуется сравнительно кратковременное охлаждение или необходимо отвести небольшие количества теплоты, криоагенты для этих целей привозят со стороны в специальных изолированных от внешнего теплопритока сосудах.

ства некоторых криоагентов [13]

| Плотность газа при атмосферном* давлении, $T = -273,15$ К, кг/м <sup>3</sup> | Плотность жидкости при атмосферном* давлении, кг/м <sup>3</sup> | Теплота парообразования при атмосферном* давлении, кДж/кг | Критические параметры |              |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------|--------------|
|                                                                              |                                                                 |                                                           | $P_{кр}$ , МПа        | $T_{кр}$ , К |
| 1,25046                                                                      | 804                                                             | 199,4                                                     | 3,59906               | 126,25       |
| 1,78394                                                                      | 1393                                                            | 161,7                                                     | 5,42694               | 150,65       |
| 0,089988                                                                     | 70,80                                                           | 449,8                                                     | 1,31198               | 33,19        |
| —                                                                            | —                                                               | —                                                         | —                     | —            |
| 1,2928                                                                       | 873                                                             | 205,2                                                     | ~3,7743               | 132,42       |
| 0,17846                                                                      | 125                                                             | 20,9                                                      | 0,229                 | 5,2          |
| 0,1345                                                                       | 58,9                                                            | 8,4                                                       | 0,115                 | 3,3105       |
| 1,42895                                                                      | 1142                                                            | 212,8                                                     | 5,04598               | 154,58       |
| 0,7168                                                                       | 426                                                             | 510                                                       | 4,62042               | 190,6        |
| 0,8999                                                                       | 1206                                                            | 86                                                        | 2,65269               | 44,6         |
| 1,635                                                                        | 1500                                                            | 165,9                                                     | 5,21824               | 144,31       |

Для отвода больших количеств теплоты и особенно когда системы работают непрерывно, установки для получения и использования криотемператур объединяются в общие системы. Некоторые из таких систем мы рассмотрим в последующих параграфах.

## 2. ИСПАРИТЕЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Простой и надежный способ охлаждения жидкости уменьшением давления равновесного пара (вакуумированием парового пространства) с давних пор широко применяется как в исследовательских лабораториях, так и в промышленности. Еще М. Фарадеем в 1840 г. использовался метод вакуумирования для понижения температуры смеси, состоящей из спирта или эфира и льда двуокиси углерода. Эта смесь при температуре приблизительно  $-110^{\circ}\text{C}$  использовалась им для охлаждения различных газов с целью их ожижения. Так были ожижены этилен, фосфористый водород и другие газы.

Этот же метод блестяще применили в 1883 г. К. Ольшевский и З. Вроблевский для охлаждения жидкого этилена, который в свою очередь использовался для ожижения кислорода.

Позже, в 1898—1900 гг. охлаждение вакуумированием парового пространства широко применялось Дж. Дьюаром в процессах получения жидкого и твердого водорода. При попытке получить твердый гелий Г. Камерлинг-Оннес в 1909 г. достиг вакуумированием парового пространства температуры жидкого гелия всего на один градус выше абсолютного нуля.

Этот метод широко используется и в настоящее время. Вакуумированием понижают температуру жидкого азота, служащего для предварительного охлаждения потока газа в водородных или гелиевых ожижителях и рефрижераторах; его применяют также для получения твердого азота, водорода и других криоагентов.

Рассмотрим причину понижения температуры конденсированных газов при вакуумировании парового пространства.

Между жидкостью и ее паром, находящимися в закрытом сосуде при постоянной температуре, устанавливается динамическое равновесие. Это означает, что в каждый момент количества молекул, перешедших из жидкости в пар и из пара в жидкость, равны. Давление

пара в этом случае для чистого вещества зависит только от температуры. Чем выше температура, тем больше давление, и наоборот, чем ниже температура, тем меньше равновесное давление.

Нарушение динамического равновесия приводит к процессам, стремящимся восстановить его вновь. Так, если понизить давление пара над жидкостью, уменьшится и ее температура. Самопроизвольно установившееся равновесие будет соответствовать теперь меньшим значениям давления и температуры. Этот процесс можно объяснить так. Для испарения жидкости, как известно, требуется подводить, а для конденсации пара, наоборот, отводить теплоту, равную теплоте фазового перехода. Поскольку в условиях динамического равновесия температура и соответствующее ей давление пара в сосуде остаются неизменными, то и теплоты фазовых переходов при испарении и конденсации равны. Следовательно, для поддержания динамического равновесия не требуется подводить к сосуду или отводить от него какое-либо количество теплоты. Динамическое равновесие в закрытом сосуде устанавливается самопроизвольно.

Другая картина наблюдается при искусственном нарушении этого равновесия. Если, например, из сосуда начать откачивать пар, его давление будет понижаться и количество молекул, переходящих в единицу времени из жидкости в пар, будет больше, чем из пара в жидкость. Следовательно, и количество теплоты, поглощенной в каждый момент испаряющейся жидкостью, будет больше количества теплоты, выделенной конденсирующимся паром. Разница в количествах поглощенной и выделенной в каждый момент теплот и приводит к охлаждению остающейся в сосуде жидкости в течение всего времени откачивания пара.

Таким образом, если в сосуде при откачке непрерывно понижается давление, то и температура жидкости уменьшается вплоть до достижения тройной точки.

С момента появления первого кристалла льда давление в сосуде при дальнейшей откачке остается неизменным, а в жидкости начинают образовываться все новые и новые кристаллы. Так будет продолжаться до тех пор, пока жидкость полностью не затвердеет. После этого давление пара начнет снова понижаться и соответственно будет понижаться и температура льда,

стремясь в пределе к абсолютному нулю. Однако снижение температуры льда в реальных условиях быстро прекращается вследствие ограниченных технических возможностей понижения давления.

Отвод пара возможен и без уменьшения давления и соответственно температуры жидкости. Но в этом случае необходимо подводить к ней

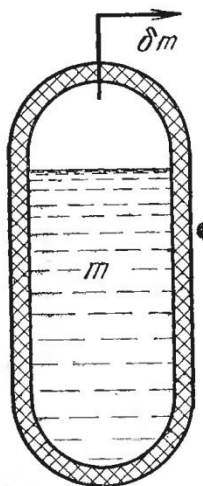


Рис. 2. Охлаждение жидкости вакуумированием парового пространства.

такое количество теплоты, которое бы обеспечивало равенство масс испаряемого и отводимого в виде пара вещества. Так, например, происходит с кипящей водой в открытом сосуде, пар которой непрерывно отводится; температура жидкости при этом остается постоянной. Достаточно изменить количество подведенной теплоты, как тут же самопроизвольно меняется масса отводимого пара.

Нас будет интересовать только первый случай, когда сосуд изолирован и при откачке пара температура жидкости непрерывно понижается. Это понижение температуры можно легко вычислить аналитически.

Пусть в сосуде с идеальной тепловой изоляцией (рис. 2) находится масса  $m$  жидкости. При откачке пара, находящегося с ней в равновесии, давление и соответственно температура жидкости понижаются.

Если за бесконечно малое время  $\delta t$  удалить  $\delta m$  пара, то температура оставшейся жидкости понизится на  $\delta T$  градусов. Тогда из уравнения энергетического баланса системы (рис. 2) можно записать:

$$mc_s \delta T = \delta m r, \quad (1)$$

где  $c_s$  — теплоемкость жидкости на линии насыщения;  $r$  — теплота парообразования.

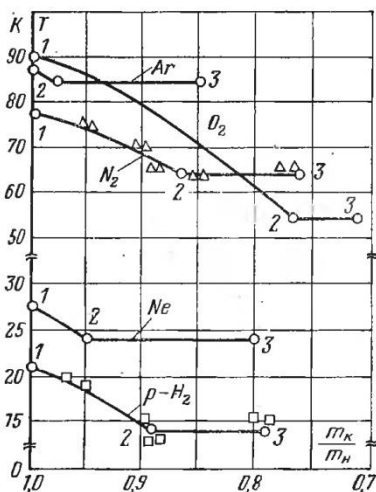
Левая часть уравнения (1) представляет собой количество теплоты, отведенной за время  $\delta t$  от оставшейся в сосуде жидкости; правая — количество теплоты, отведенной за это время из системы вместе с откачанным паром.

Преобразуя уравнение (1), получаем:

$$\frac{\delta m}{m} = \frac{c_s}{r} \delta T. \quad (2)$$

За конечное время  $\tau$  из сосуда будет откачано  $\Sigma \delta m$  пара, что приведет к понижению температуры оставшей-

Рис. 3. Зависимость температуры криогенных веществ от количества откачанного пара.  $m_k$  — масса оставшегося в сосуде криоагента в конце процесса откачки;  $m_n$  — масса исходной жидкости при температуре насыщения;  $\Delta$ ,  $\square$  — экспериментальные точки.



ся жидкости на  $\Sigma \delta T$  градусов. С учетом этого уравнение (2) примет вид:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\delta m}{m} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_s}{r} \delta T, \quad (3)$$

где  $n$  — число интервалов, на которые разбивается процесс откачки. Из уравнения (3) легко определить понижение температуры жидкости, задавшись количеством откачанного пара и зная зависимость от температуры  $c_s$  и  $r$ .

Для большинства криогенных жидкостей зависимости теплоемкости и теплоты парообразования от температуры с погрешностью, не превышающей 5%, можно принять линейными или считать эти величины постоянными. Значения  $c_s$  и  $r$  принимаются по справочным данным.

На рис. 3 показана зависимость температуры некоторых криогенных веществ от количества откачанного

пара, рассчитанная по уравнению (3) и определенная экспериментально для адиабатных и неадиабатных условий [8]. С погрешностью, не превышающей 5%, экспериментальные данные соответствуют теоретическим значениям, найденным по уравнению (3). Точкой 1 на графике обозначена исходная температура криогенной жидкости, соответствующая ее насыщению при атмосферном давлении.

Когда температура жидкости достигнет тройной точки 2, при дальнейшей откачке начнется образование кристаллов. Поскольку наиболее холодная зона находится на границе раздела паровой и жидкой фаз, то образование кристаллов начинается на поверхности жидкости. Для этого процесса можно записать следующее уравнение:

$$(m'_2 - m''_2) x r_{пл} = r_{т.т} m''_2, \quad (4)$$

где  $m'_2$  — масса жидкости при температуре тройной точки перед образованием первого кристалла;  $m''_2$  — масса откачанного пара;  $x$  — доля твердой фазы;  $r_{пл}$ ,  $r_{т.т}$  — соответственно теплоты плавления и парообразования при температуре тройной точки.

Уравнение (4) составлено для адиабатных условий процесса замораживания. Пользуясь этим уравнением, можно определить необходимую массу  $m''_2$  пара, которую потребуется удалить из системы для получения заданной доли  $x$  твердой фазы при условии, что жидкость перед замораживанием находилась при температуре тройной точки.

На рис. 3 горизонтальными линиями показаны зависимости доли твердой фазы от относительной величины оставшегося в сосуде криоагента, рассчитанные с использованием уравнений (3) и (4). Точка 2 соответствует появлению первого кристалла (тройной точке), точка 3 — 100% твердой фазы. Масса криоагента, находящегося в паровом пространстве сосуда, в расчет не принималась. Кружками обозначены значения, полученные экспериментально [8]. Отклонение экспериментальных данных от рассчитанных теоретически также не превышает 5%.

Пользуясь графиком на рис. 3, можно легко определить количество пара, которое необходимо откачать для получения криоагента в заданном состоянии. Пусть, например, требуется получить твердый неон при темпе-



ратуре тройной точки (точка 3). Опустив из точки 3 перпендикуляр на оси абсцисс, получим  $m_{\text{ж}}/m_{\text{н}}=0,8$ . Следовательно, для полного замораживания жидкого неона, находящегося при нормальной температуре кипения, требуется откачать в виде пара 20% его начальной массы.

Если требуется охладить жидкий неон до температуры тройной точки, то, проделав аналогичные операции, получим, что для этого необходимо откачать всего 5% исходной массы и т. д.

Вакуумирование парового пространства применяется и для получения веществ, находящихся в так называемом *шугообразном* состоянии. Под шугой понимают в этом случае смесь жидкой и твердой фаз одного и того же вещества.

Но охлаждение вакуумированием парового пространства обладает и существенным недостатком, поскольку в этом процессе удаляется из системы в виде пара значительная доля первоначального запаса вещества. Поэтому такой метод охлаждения применяют там, где на первый план выступает требование простоты и надежности.

### 3. ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ДРОССЕЛИРОВАНИИ

Если на пути газа или жидкости, протекающих по трубопроводу, встречается какое-нибудь местное сопротивление, суживающее сечение потока, то давление среды после этого устройства всегда оказывается меньшим, чем до него. Такое явление называется *дресселированием*. Оно происходит, например, при прохождении потока через полуоткрытые вентили, задвижки, различные диафрагмы или другие устройства, установленные в трубопроводе, и сопровождается не только понижением давления, но и, как правило, изменением температуры дресселируемой среды, что и позволяет в ряде случаев использовать дресселирование для получения низких температур.

Этот эффект был открыт в 1852 г. Д. Джоулем и В. Томсоном (Кельвином) при изучении свойств реальных газов.

Исследователи пропускали с небольшой скоростью сжатый газ через пористую пробку, сделанную из ваты и размещенную в трубе. При этом давление снижалось

от  $p_1$  до  $p_2$  и происходило изменение температуры, что фиксировалось установленными в трубопроводе термометрами.

Рассмотрим причины, вызывающие изменение температуры газа в процессе дросселирования. Пусть в трубе 1 (рис. 4), одинаковой по всей длине по диаметру и идеально изолированной от теплопритока извне, установлена пористая пробка 2. До пробки 2 и после нее

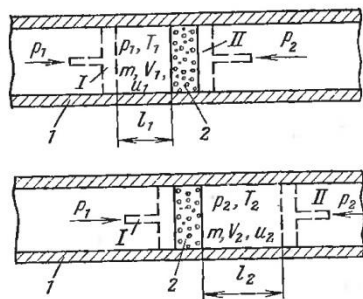


Рис. 4. Схема процесса дросселирования.

давления среды поддерживаются постоянными и равными соответственно  $p_1$  и  $p_2$ . Для того, чтобы переместить газ вдоль трубы, необходимо затратить работу. Предположим, что эта работа прикладывается к воображаемому поршню I, перемещающему газ по направлению к пористой пробке. В действительности таким поршнем служит сама рабочая среда, проталкиваемая по трубе, например, компрессором.

Если поршень I переместить на расстояние  $l_1$ , то он протолкнет через пористую пробку массу газа  $m$ , имеющую объем  $V_1$ . При этом работа, отданная поршнем, будет равна:

$$L_1 = p_1 s l_1 = p_1 V_1 = p_1 m v_1, \quad (5)$$

где  $s$  — площадь поршня;  $v_1$  — удельный объем газа.

Газ, прошедший пористую пробку, переместит воображаемый поршень II на расстояние  $l_2$ . В процессе прохождения через препятствие давление газа снизится с  $p_1$  до  $p_2$ . При этом за пористой пробкой газ произведет работу, равную

$$L_2 = p_2 s l_2 = p_2 V_2 = p_2 m v_2, \quad (6)$$

где  $v_2$  — удельный объем газа, прошедшего пористую пробку.

Будем считать, что скорость потока до дроссельного устройства и после него одинакова и неизменна. Тогда по закону сохранения энергии можно записать уравнение

$$m u_1 + m p_1 v_1 = m u_2 + m p_2 v_2, \quad (7)$$

или для единицы массы газа

$$u_1 + p_1 v_1 = u_2 + p_2 v_2, \quad (8)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  — соответственно внутренняя энергия газа до дросселирования и после него.

Из уравнения (8) получаем:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = p_1 v_1 - p_2 v_2. \quad (9)$$

Внутренняя энергия идеального газа не зависит от давления и объема, поэтому при дросселировании, как это следует из правой части уравнения (9),  $\Delta u = 0$ . Из уравнения (9) также получаем  $p_1 v_1 = p_2 v_2$ , т. е. работа, переданная поршнем I газу до дросселирования, равна работе, отданной газом поршню II после дросселирования. Отсюда по закону Клапейрона следует, что  $T_1 = T_2$ . Температура идеального газа при дросселировании не меняется.

В отличие от идеальных газов, внутренняя энергия которых зависит только от температуры или, другими словами, от кинетической энергии молекул, в реальных газах внутренняя энергия складывается из двух составляющих: кинетической энергии отдельных молекул или их ассоциаций и потенциальной составляющей.

Потенциальная энергия связана с силами межмолекулярного взаимодействия. Эти силы обусловлены в основном электрическими факторами.

Простейшая молекула одноатомного газа представляет собой диполь, поэтому межмолекулярное взаимодействие носит сложный характер. Оно обуславливается как силами притяжения разноименных зарядов, так и силами отталкивания одноименных зарядов. То же самое происходит и с группами или ассоциациями молекул.

Расширение реального газа направлено против сил взаимного притяжения молекул и поэтому ведет всегда к уменьшению внутренней энергии, а следовательно, и температуры. Но одновременно действуют и другие факторы.

Взаимное отталкивание молекул и расширение газа направлены в одну сторону. Оба фактора ведут к увеличению расстояния между молекулами газа и, следовательно, к уменьшению потенциальной энергии. Но силы отталкивания при расширении как бы ускоряют мо-

лекулы газа и поэтому потенциальная составляющая внутренней энергии, связанная с этими силами, переходит в кинетическую, что и ведет к повышению температуры.

Силы межмолекулярного взаимодействия зависят от расстояния между молекулами. Если расстояние между молекулами соизмеримо с размерами самих молекул, то преобладают силы отталкивания.

По мере увеличения расстояния силы отталкивания резко уменьшаются. Уменьшаются также и силы взаимного притяжения, но в значительно меньшей степени. Следовательно, с какого-то определенного момента, начинают преобладать силы взаимного притяжения молекул. При дальнейшем увеличении расстояния силы межмолекулярного взаимодействия уменьшаются настолько, что реальный газ практически не отличается от идеального.

Преобладание тех или иных сил межмолекулярного взаимодействия сказывается на конечном температурном эффекте дросселирования.

Если перед расширением газ находится в таком состоянии, что преобладают силы взаимного притяжения молекул, то в процессе дросселирования происходит понижение температуры; если преобладают силы отталкивания, то температура повышается.

Кроме рассмотренных выше факторов, на температурный эффект дросселирования оказывает влияние трение газа о каналы дроссельного устройства. Теплота трения полностью переходит в кинетическую составляющую внутренней энергии газа, что ведет также к повышению его температуры. Однако нагревание, связанное с трением потока, обычно невелико и не вносит решающего вклада в окончательный температурный эффект дросселирования.

Проведем оценку влияния реальности газа на температурный эффект дросселирования.

Приближенно свойства реальных газов могут быть описаны известным уравнением Ван-дер-Ваальса.

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT. \quad (10)$$

В этом уравнении силы взаимного притяжения молекул учитываются поправкой  $a/v^2$ , а конечный объем молекул, пропорциональный силам отталкивания, — величиной  $b$ .

Величины  $a$  и  $b$  — постоянные, определяются из эксперимента и зависят только от природы вещества. При  $a=b=0$  уравнение Ван-дер-Ваальса превращается в уравнение Клапейрона для идеальных газов.

С помощью уравнения Ван-дер-Ваальса можно приближенно оценить, в каких случаях следует ожидать охлаждения или нагревания газа в процессе дросселирования [21]. Так, если силы взаимного притяжения между молекулами малы и ими можно пренебречь, то уравнение Ван-дер-Ваальса примет вид:

$$p(v-b)=RT. \quad (11)$$

Подставив значение  $pv$  из (11) в (9), получим:

$$\begin{aligned} \Delta u &= u_2 - u_1 = p_1 v_1 - p_2 v_2 = \\ &= R(T_1 - T_2) + b(p_2 - p_1). \end{aligned} \quad (12)$$

Как показывают опыты, проведенные с реальными газами, во всех случаях при дросселировании изменение температуры значительно менее интенсивно, чем давления. Поэтому независимо от знака  $T_2 - T_1$  величина  $\Delta u$  будет положительна. Это означает, что в процессе дросселирования реального газа, у которого силы взаимного притяжения молекул невелики, внутренняя энергия  $u$ , а следовательно, и температура  $T$  возрастают.

Поскольку расширение газа всегда уменьшает силы межмолекулярного взаимодействия, а следовательно, и потенциальную энергию, то можно утверждать, что в рассмотренном выше случае произошло преобразование потенциальной энергии в кинетическую.

Если в уравнении Ван-дер-Ваальса пренебречь величиной  $b$  и провести аналогичные преобразования, как это было сделано в предыдущем случае, то получим:

$$\Delta u = u_1 - u_2 = p_1 v_1 - p_2 v_2 = R(T_1 - T_2) + a \left( \frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right). \quad (13)$$

Пренебрегая в первом приближении (независимо от знака  $\Delta T$ ) в правой части (13) первым слагаемым, находим, что  $\Delta u$  отрицательно. Следовательно, газ в процессе дросселирования охлаждается. В этом случае силы притяжения тормозят движение молекул при их удалении друг от друга. Таким образом, если силы при-

тяжения между молекулами имеют большее значение, чем конечный объем молекул, то в процессе дросселирования наступает охлаждение газа.

В реальных случаях при дросселировании на эффект изменения температуры одновременно влияют как силы взаимного притяжения, так и силы взаимного отталкивания молекул. Следовательно, можно найти такие началь-  
 начальные условия ( $p, v$ ), когда

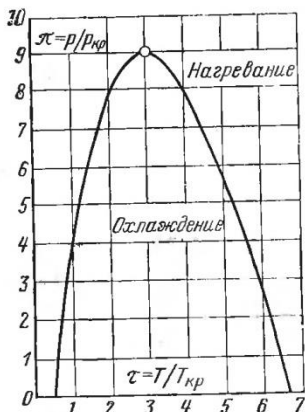


Рис. 5. График инверсионной кривой.

оба рассмотренных фактора влияют на процесс дросселирования в одинаковой степени, но, естественно, с разным знаком. Отклонение от этих условий в ту или иную сторону приводит соответственно к повышению или понижению температуры в процессе дросселирования.

Начальная температура, при которой меняется знак эффекта дросселирования, называется *температурой инверсии*. Выше этой температуры дросселирование сопровождается повышением температуры газа, ниже — соответственно пони-

жением. Для газов при одном и том же давлении существуют две температуры инверсии: верхняя, которая находится в области сравнительно более высоких температур, и нижняя, соответствующая, как правило, конденсированному состоянию.

Ориентировочно верхнюю температуру инверсии можно найти, подставив значение  $p_1$  из (10) в (9) и приняв газ в конце процесса расширения вследствие его большего объема за идеальный. Тогда после соответствующих преобразований получим:

$$T_1 \approx \frac{2a}{Rb}, \quad (14)$$

откуда при известных коэффициентах  $a$  и  $b$ , а также газовой постоянной  $R$  определяется температура инверсии.

На рис. 5 показана в приведенных координатах инверсионная кривая для газов, подчиняющихся уравнению Ван-дер-Ваальса.

Внутренняя область, ограниченная кривой инверсии, соответствует охлаждению газов при дросселировании, наружная — нагреванию. Из графика легко определить по известным критическим параметрам ( $p_{кр}$ ,  $T_{кр}$ ) вещества (см. табл. 1), в каком диапазоне давлений и температур дросселирование приводит к понижению температуры.

Несмотря на то что изменение температуры газа с изменением давления при дросселировании невелико, этот процесс нашел из-за своей простоты широкое техническое применение. Так, используя дросселирование, К. Линде в 1895 г. построил первый промышленный ожижитель воздуха.

#### 4. РАСШИРЕНИЕ ГАЗОВ С СОВЕРШЕНИЕМ ВНЕШНЕЙ РАБОТЫ

Направив сжатый газ подобно водяному пару высокого давления в турбину или цилиндр поршневой машины, получим в процессе его расширения работу. При этом газ сильно охлаждается. Изменение температуры в таком процессе существенно больше, чем в случае дросселирования при одинаковом перепаде давления.

Машины, предназначенные для расширения газа с отдачей работы, называются *детандерами*. Слово «детандер» происходит от французского *detente* — расширение.

Рассмотрим процесс расширения газа на примере идеального (без потерь) поршневого детандера. Детандер (рис. 6) состоит из цилиндра 1, поршня 2, впускного 3 и выпускного 4 клапанов. Работа  $l$  расширения газа передается поршню 2, от которого она может быть отведена дальше тем или иным способом.

Процесс расширения происходит следующим образом. Когда поршень 2 находится в крайнем левом положении, открывается впускной клапан 3 и газ высокого давления начинает заполнять цилиндр. При этом поршень перемещается вправо. Работу  $p_1 v_1$  наполнения цилиндра совершает компрессор, проталкивая газ по трубопроводу к детандеру. После того, как в цилиндр де-

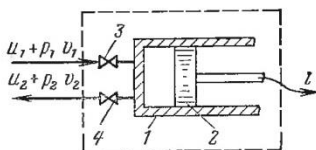


Рис. 6. Схема расширения газа в детандере.

тандера войдет определенная масса газа, клапан 3 закрывается. Вошедший газ расширяется, отдавая работу поршню.

Когда давление в цилиндре снизится с  $p_1$  до  $p_2$ , открывается выпускной клапан 4, а поршень начинает перемещаться справа налево, сообщая газу работу выталкивания, равную  $p_2 v_2$ .

Таким образом, поршню отдается работа  $p_1 v_1$  наполнения и работа расширения газа, а поршень в свою очередь совершает работу над газом, равную  $p_2 v_2$ .

Если отсутствует теплообмен с окружающей средой и если пренебречь изменением кинетической энергии газа аналогично тому, как это делалось при рассмотрении дросселирования, то для контура (см. рис. 6), ограниченного штриховой линией, можно составить следующее уравнение энергетического баланса:

$$u_1 + p_1 v_1 = u_2 + p_2 v_2 + l, \quad (15)$$

или

$$\Delta u = u_2 - u_1 = p_1 v_1 - p_2 v_2 - l, \quad (16)$$

где  $l$  — работа, отведенная от единицы массы расширяющегося газа. Сопоставив полученное уравнение (16) с (9), нетрудно заметить, что в последнем случае  $\Delta u$  будет всегда со знаком минус, т. е. будет всегда происходить охлаждение газа. Действительно, работа  $l$  по абсолютной величине больше нуля, а из (16) следует, что и при равенстве  $p_1 v_1$  и  $p_2 v_2$  значение  $\Delta u < 0$ . Значит, и расширение идеального газа с отдачей внешней работы приведет к его охлаждению.

Температуру  $T_2$  в конце процесса расширения для рассмотренных выше условий можно легко определить, используя уравнение адиабаты

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k = \text{const} \quad (17)$$

и уравнение Клапейрона

$$pv = RT. \quad (18)$$

Подставив значение  $v$  из (18) в (17), для начальных и конечных условий процесса получим:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (19)$$

Аналогичным образом можно вычислить температуру в конце адиабатного расширения реального газа. Но



так как уравнение состояния реального газа более сложно, чем (18), то и выражение для  $T_2$  будет более громоздким. Обычно для вычисления  $T_2$  пользуются таблицами или диаграммами состояния реального газа, откуда по известным  $p_1$ ,  $v_1$ ,  $p_2$  и  $s_1=s_2$  легко определить все параметры в конце процесса расширения.

Сопоставим эффекты понижения температуры воздуха при его дросселировании и расширении в детандере. Пусть воздух перед расширением имеет  $p_1=20$  МПа,  $T_1=300$  К, после расширения  $p_2=0,5$  МПа. Процесс расширения в обоих случаях происходит без теплообмена с окружающей средой.

Используя  $T$ ,  $s$ -диаграмму состояния воздуха [13], получаем, что в случае дросселирования конечная температура  $T_2$  составит 267 К, а при расширении в детандере — 100 К.

Таким образом, применив детандер вместо дросселя, можно получить существенно более низкую при прочих равных условиях температуру, чем в случае дросселирования. Однако этот теоретически весьма эффективный и на первый взгляд простой способ понижения температуры оказалось чрезвычайно трудно реализовать на практике.

Первые поршневые воздушные машины для получения низких температур были построены в 1840—1850 гг. [1]. Но более существенного по сравнению с другими известными способами понижения температуры достигнуть в них тогда не удалось. Этому препятствовал ряд технических трудностей, о которых рассказывается ниже.

В 1857 г. Сименс предложил оригинальную схему ожижения с использованием поршневого детандера. Эта схема (рис. 7) заслуживает более подробного рассмотрения. Сжатый газ по центральной трубе 1 поступает в цилиндр поршневого детандера 2, расширяется с отдачей работы на поршень, охлаждается и идет по трубе 3 противотоком прямому потоку.

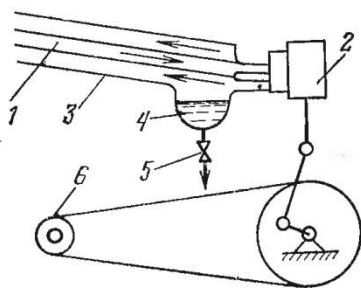


Рис. 7. Схема ожижителя Сименса.

Сконденсировавшаяся часть собирается в отделителе жидкости 4, откуда может быть слита через вентиль 5. Обратный поток служит для охлаждения сжатого газа, поступающего в цилиндр машины. Работа, получаемая при расширении, используется для привода электрогенератора 6.

В схеме Сименса сочетаются две блестящие идеи: применение машины (пневмодвигателя) для производства холода и использование полученного холода для понижения температуры поступающего газа. И все же Сименсу не удалось понизить температуру воздуха настолько, чтобы произошла его конденсация.

Казалось, технические трудности, возникающие на пути использования детандера, делают его применение бесперспективным. Вот что писал по этому поводу в 1896 г. известный ученый, построивший первый в мире промышленный ожижитель воздуха, профессор Мюнхенского университета К. Линде: «Практическое осуществление этого процесса (теоретически неоспоримого) является сомнительным по следующим причинам. Предположим, что в этом процессе был бы применен атмосферный воздух при той температуре, которая нужна для его ожижения; при этой температуре все вещества, содержащиеся в воздухе в качестве примесей: вода, двуокись углерода и т. п., так же как и остатки применяемых смазывающих материалов, перешли бы в твердое состояние. В этих условиях стала бы невозможной работа цилиндра расширения и его распределительных механизмов. Те лица, которым приходилось работать при таких низких температурах, знают по опыту, насколько трудно в этих условиях управление даже простым вентилем. Вместе с тем было бы чрезвычайно трудно или даже невозможно защитить с необходимой для этих низких температур тщательностью как сам цилиндр расширения, так и его механизмы от влияния внешнего тепла, и, следовательно, этот способ совершенно непригоден для достижения этих низких температур» [11].

Не прошло и шести лет после такого категоричного высказывания, как воздух стали ожижать в промышленных масштабах в установках с использованием детандера. Впервые это осуществил в 1902 г. Ж. Клод. После ряда лет поисков ему удалось достаточно полно очистить воздух от примесей воды и двуокиси углерода. Оказалось также, что поршень в цилиндре можно эф-

эффективно уплотнять с помощью специальных манжет из обезжиренной кожи, которая при низких температурах не затвердевает и не требует смазки. Теплоприток из окружающей среды оказался не столь существенным, как предполагал Линде, и не мог решающим образом повлиять на эффективность детандера. Клоду удалось также весьма удачно видоизменить схему Сименса, и получение жидкого воздуха в установке с использованием поршневого детандера стало технически более простым и эффективным.

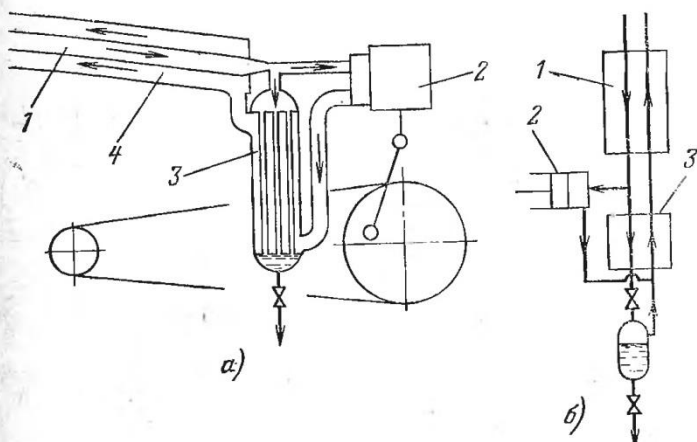


Рис. 8. Использование поршневого детандера в ожижителе Клода.  
а — ожижение воздуха под давлением; б — ожижение воздуха с использованием детандера и эффекта Джоуля — Томсона.

Схема установки Клода показана на рис. 8, а. Сжатый воздух проходит по внутренней трубе 1, охлаждается обратным потоком и поступает в детандер 2. Расширенный и охлажденный до еще более низкой температуры воздух поступает в межтрубное пространство теплообменника 3, где нагревается, охлаждая воздух в трубках, и идет противотоком по кольцевому зазору, образованному трубами 1 и 4. В трубках теплообменника 3 воздух находится под давлением прямого потока. Если это давление не превышает критическое, то в общем случае, чем оно выше, тем при более высокой температуре будет происходить конденсация. Поэтому

схеме Клода не обязательно было доводить воздух до состояния конденсации уже в цилиндре детандера. В детандере достаточно было получить такую температуру, при которой могла бы произойти конденсация воздуха, находящегося в трубках под повышенным давлением.

С целью улучшения условий работы поршневого детандера Ж. Клод подверг схему дальнейшему усовершенствованию. Его новая схема (рис. 8,б) сочетала в себе уже два способа охлаждения: расширение в детандере и дросселирование. Эта схема оказалась настолько удачной, что ее стали успешно применять не только для ожижения воздуха, но и с небольшими изменениями (с использованием дополнительного охлаждения прямого потока) для ожижения других газов, таких как, например, водород, гелий и т. д.

В новой схеме Клода (рис. 8,б) прямой поток проходит теплообменник 1 и делится, как и в предыдущем случае (рис. 8,а), на две части. Одна поступает в детандер 2, охлаждается при расширении и идет противотоком в теплообменники 3 и 1. Другая часть прямого потока проходит теплообменник 3, где дополнительно охлаждается, и поступает на дросселирование. При дросселировании давление и температура воздуха понижаются и происходит его конденсация. Теперь в детандере не обязательно получать даже такую температуру, которая обеспечила бы конденсацию прямого потока в теплообменнике 3. Другими словами, в теплообменнике 3 теперь не обязательно добиваться конденсации воздуха прямого потока, а необходимо только охладить его до такой температуры, чтобы при последующем дросселировании наступила конденсация.

Так, остроумно используя сочетание различных способов охлаждения, Ж. Клоду удалось построить высокоэффективную схему ожижения.

Из рассмотрения схем на рис. 8 становится ясной важность включения противоточного теплообменника. Роль теплообменных аппаратов в схемах криогенных установок весьма велика, и этот вопрос мы специально рассмотрим в § 7.

Интересно отметить, что идея использования турбины для охлаждения газа, высказанная еще в 1898 г. Рэлеем и Труппом, была реализована только в 30-х годах нашего столетия. Наиболее удачный турбодетандер разработал в 1938 г. академик П. Л. Капица [1, 13, 17].

## 5. ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗОВ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА

В декабре 1877 г. С. Кайете проводил опыты по ожигению ацетилена. Этот газ он выбрал, вероятно, потому, что ацетилен мог быть сравнительно легко ожиген известными к тому времени способами. Критическая температура ацетилена равна  $+37^{\circ}\text{C}$ . Поэтому для его ожигения даже при температуре окружающей среды достаточно было повысить давление всего до 6,8 МПа.

Задача Кайете состояла в том, чтобы многократно повторить опыты с одной и той же порцией газа.

Для этой цели он разработал экспериментальную установку (рис. 9, а), аналогичную тем, которые исполь-

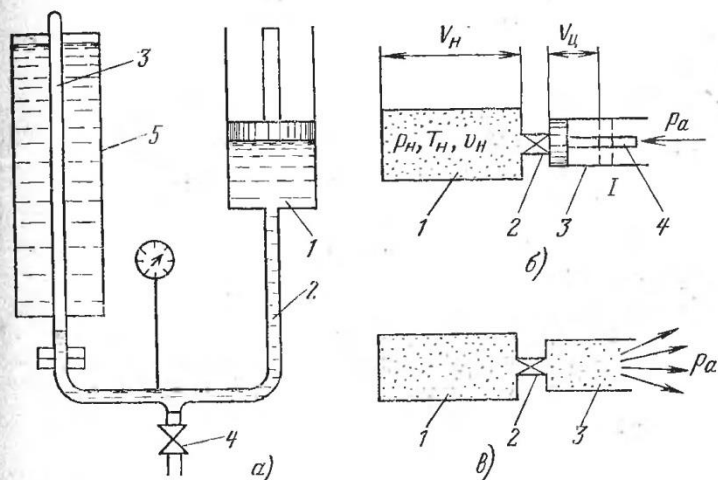


Рис. 9. Принципиальная схема аппарата Кайете.

зовались его предшественниками. Установка состояла из гидравлического пресса 1, соединенного с помощью трубопровода 2 с толстостенной стеклянной трубкой 3, запаянной с одного конца. Внутренняя полость трубки заполнялась исследуемым газом; снаружи трубка могла охлаждаться смесью 5.

Для того чтобы вернуть сжатый газ в исходное состояние, в схеме был предусмотрен кран 4, позволяющий выпускать из системы часть жидкости, с помощью которой производилось сжатие.

В одном из экспериментов, когда давление в системе не достигло еще значения, достаточного для ожижения ацетилена, случайно был открыт кран 4\*. При этом давление резко понизилось, и Кайете успел заметить помутнение содержимого трубки 3. Сначала он предположил, что на стенке трубки сконденсировались примеси влаги или какого-то другого вещества, находящегося в ацетилене. После повторения опыта с заведомо чистым газом было однозначно установлено, что в процессе резкого расширения ацетилена наступает сильное охлаждение, приводящее к его конденсации.

Так был обнаружен весьма эффективный способ охлаждения, представляющий собой расширение газа в процессе его истечения из сосуда постоянного объема. Кайете применил этот способ для ожижения газов, считавшихся в то время «постоянными». Результаты не замедлили сказаться. Первыми были ожижены метан, окись углерода и кислород. Затем ожижению подвергся и азот.

Рассмотрим теперь несколько подробнее причину, вызывающую охлаждение газов при их истечении из сосудов постоянного объема. Для этой цели установку Кайете изобразим в несколько ином виде. Стекланную трубку заменим сосудом 1 (рис. 9,б), в котором находится сжатый газ с начальными параметрами  $p_n$ ,  $v_n$ ,  $T_n$ . Этот сосуд соединим с помощью вентиля 2 с цилиндром 3, в котором поддерживается поршнем 4 постоянное давление  $p_a$ , равное атмосферному.

Если открыть вентиль 2, то газ в сосуде 1 будет расширяться до тех пор, пока давление  $p_n$  не станет равным  $p_a$ . При этом газ, вытекающий из сосуда в цилиндр, перетолкнет поршень вправо. Пусть поршень остановится в положении 1, отмеченном штриховыми линиями. Объем, занятый газом в конце расширения, будет равен:

$$V_k = V_n + V_{ц} \quad (20)$$

В процессе расширения газ совершит работу, которую можно определить из уравнения

$$L = p_a (V_k - V_n). \quad (21)$$

---

\*. В [16] дается несколько иная трактовка. В частности, говорится, что охлаждение газа было связано с неожиданно появившейся течью.

Если отсутствует теплообмен с окружающей средой, то совершаемая газом работа осуществляется за счет уменьшения его внутренней энергии. Поэтому для случая, когда температура в рассматриваемой системе (сосуд — цилиндр) после расширения по истечении некоторого времени выравнивается, можно записать для 1 кг массы газа следующее уравнение:

$$u_k - u_n = p_a(v_k - v_n). \quad (22)$$

Заменив внутреннюю энергию через энтальпию по уравнению

$$i = u + pv, \quad (23)$$

получим:

$$\Delta i = i_k - i_n = p_n v_n \left(1 - \frac{p_a}{p_n}\right). \quad (24)$$

Уравнение (24) справедливо для любого газа и описывает эффект охлаждения всей массы вещества в рассмотренном процессе.

Пользуясь таблицами или диаграммами состояния реальных веществ, можно легко определить из (24) изменение энтальпии, а следовательно, и температуры.

Для идеального газа, заменив  $p_k v_n$  на  $RT_n$  и подставив в (24) вместо  $\Delta i$  произведение  $c_p \Delta T$ , получим:

$$\Delta T = T_n - T_k = \frac{k-1}{k} T_n \left(1 - \frac{p_a}{p_n}\right). \quad (25)$$

Если расширение производилось не до атмосферного давления, а до какого-либо произвольного конечного давления  $p_k$ , то в уравнениях (24) и (25)  $p_a$  следует заменить на  $p_k$ .

Мы рассмотрели процесс, в котором после расширения установилось равновесное состояние во всей массе газа. В течение процесса расширения, который происходит довольно быстро и поэтому иногда называется *выхлопом*, изменение температуры в сосуде и цилиндре идет неодинаково. Действительно, в момент открывания вентиля 2 в цилиндр выталкивается первая бесконечно малая порция газа с температурой, близкой к  $T_n$ . Освободившееся в результате выхода первой порции газа место в сосуде занимает оставшийся в нем газ. При этом он расширяется и его температура понижается. Это расширение происходит с совершением работы по выталкиванию выходящего из сосуда газа. Поэтому каждая последующая порция, поступающая из сосуда

в цилиндр, будет иметь более низкую температуру, чем предыдущая. И только самая последняя порция поступит в цилиндр практически с температурой газа, оставшегося в сосуде. Эта температура — наименьшая температура  $T'_k$  процесса. Поскольку в цилиндр поступали порции газа с различной температурой, то в конце процесса в нем образуется смесь с температурой  $T_{см}$ , значительно большей  $T'_k$ . А весь газ, оставшийся в сосуде, будет иметь температуру  $T'_k$ , которую для адиабатных условий проведения процесса можно определить по уравнению (19).

Разумеется, если смешать газ, оставшийся в сосуде, с тем, который поступил в цилиндр, то получим эффект, описываемый уравнениями (24) и (25).

Если теперь исключить из системы поршень (рис. 9, в), то легко можно увидеть, что газ, находящийся в сосуде 1, будет вести себя при расширении точно так же, как и в случае с поршнем. Другими словами, газу в сосуде 1 «безразлично», имеется ли в цилиндре поршень с противодавлением  $p_a$  или находится какая-либо другая среда с тем же противодавлением.

Теперь становится понятным, что Кайете сначала случайно, а затем и сознательно использовал один из самых эффективных способов охлаждения.

Простота и эффективность этого способа позволили позже Ф. Симону использовать его для ожижения наиболее трудно ожижаемого газа — гелия. Такой ожижитель был построен им в 1932 г., а с 1958 г. этот способ охлаждения нашел также применение в широко известных криогенных установках [17], называемых *машинами Гиффорда — Мак-Магона*.

Об этих установках можно прочитать в [13, 17].

## 6. ДРУГИЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

В предыдущих разделах мы рассмотрели способы получения низких температур, которые нашли наиболее широкое применение в холодильной и криогенной технике. Но имеются еще и другие пути снижения температуры, реализуемые по тем или иным причинам или только в лабораторных условиях, или в сравнительно не больших масштабах в промышленности. Вот некоторые из них.

В 1834 г. Ж. Пельтье установил, что при пропускании



электрического тока через контур, состоящий из двух спаянных между собой по концам разнородных проводников, один из спаев охлаждается, а другой нагревается. Следовательно, на одном из спаев можно получить температуру ниже температуры окружающей среды. На этом принципе работают термоэлектрические холодильники. Широкого технического применения термоэлектрическое охлаждение пока не получило из-за низкого к. п. д. процесса. Чаще всего оно используется в небольших кондиционерах для помещений; значительно реже — для домашних холодильников и других целей.

Эттингсхаузен открыл в 1886 г. эффект термомагнитного охлаждения, который заключается в следующем. Если через проводник (рис. 10), размещенный в постоянном магнитном поле, пропустить электрический ток в направлении, перпендикулярном магнитным силовым линиям, то в третьем перпендикулярном направлении в проводнике возникает градиент температур.

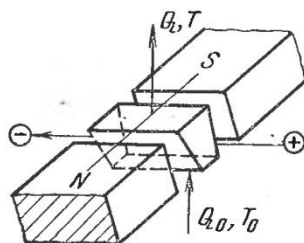


Рис. 10. Принципиальная схема термомагнитного охлаждения.

Наилучший проводник, на котором получен максимальный градиент температур, представляет собой сплав, состоящий из 97% Bi и 3% Sb. Теоретически на таком проводнике при  $T=77\text{ К}$  можно получить  $\Delta T=9\div 12\text{ К}$  при напряженности магнитного поля примерно  $10^6\text{ А/м}$ .

Охлаждающие устройства, основанные на термомагнитном эффекте, также не получили пока широкого применения из-за низкого к. п. д. Но они подкупают своей простотой и надежностью в работе, что в ряде случаев может оказаться решающим фактором при выборе способа охлаждения.

Чрезвычайно низкую температуру можно получить, используя охлаждение, возникающее при растворении жидкого  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ . Этот эффект был открыт в 1951 г. Г. Лондоном. С помощью рефрижераторов, использующих растворение  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ , удается получать температуры вплоть до  $0,003\text{ К}$ . Однако начальная температура процесса не должна превышать  $0,7\text{ К}$ . Наиболее удач-

ный непрерывно действующий рефрижератор был разработан в 1965 г. Б. С. Негановым и др. [12, 13], а рекорд в достижении этим методом наинизшей температуры ( $0,003\text{ K}$ ) принадлежит В. П. Пешкову [12].

Еще более низкие температуры получают в лабораторных условиях методом адиабатного размагничивания парамагнитных солей. Этот метод был разработан в 1926 г. независимо друг от друга В. Джоком и П. Дебаем. Его сущность состоит в следующем. Ионы парамагнитных солей можно рассматривать как элементарные магнитики, хаотически расположенные относительно друг друга. При наложении магнитного поля большая часть ионов соли ориентируется вдоль магнитных силовых линий, что приводит к их упорядочению. Это упорядочение (снижение энтропии) идет с выделением теплоты, которую необходимо отводить в процессе намагничивания. Аналогом этого процесса служит изотермическое сжатие газа в компрессоре. Намагничивание осуществляется при температурах  $1\text{—}1,5\text{ K}$ .

Если теперь для соли создать адиабатные условия и снять магнитное поле, то образец сильно охладится. Аналогом процесса адиабатного размагничивания служит расширение газа в детандере.

Наинизшая температура, полученная способом адиабатного размагничивания, составляет  $0,001\text{ K}$ . Но и эта температура — не предел, достигнутый в лабораторных условиях. С помощью ядерного размагничивания достигнута кратковременно существующая температура  $0,0000012\text{ K}$ . Идея понижения температуры при ядерном размагничивании была высказана К. Гортером и независимо от него Н. Кюрти и Ф. Симоном в 1934 г. В 1956 г. Кюрти осуществил эту идею на практике.

Некоторые элементы, такие как медь, кобальт и др., имеют существенный ядерный магнитный момент. Этот момент меньше, чем у ионов парамагнитных солей, примерно в 2000 раз. Поэтому малейшее тепловое движение нарушает ориентацию в магнитном поле ядерных осей вращения. В связи с этим ядерное намагничивание удастся производить только при температурах, значительно меньших, чем  $1\text{ K}$ . Обычно исходная температура при ядерном намагничивании (размагничивании) равна  $0,01\text{ K}$ . Такую низкую начальную температуру можно получить, например, размагничиванием парамагнитных солей. Следовательно, для того, чтобы получить пониже-

ние температуры в рассмотренных последних процессах, необходимо каким-либо другим способом печить крайне низкую исходную (начальную) температуру. Так, для растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  и бо-размагничивания требуется исходная температура вы-на 1—1,5 К выше абсолютного нуля. При ядерном раз-магничивании исходная температура лежит еще ниже и составляет 0,01 К. Конечно, такие низкие температуры не нашли еще промышленного применения, да и полу-чить их удастся далеко не в каждой лаборатории, но они представляют огромный интерес для различного рода физических исследований.

Кроме этих способов получения низких температур имеются и такие, как десорбционное охлаждение, охлаждение, основанное на эффекте Померанчука, намагничивание сверхпроводников. Они также используются пока редко даже в лабораторной практике. Желающих с ними познакомиться мы отошлем к специальной литературе [1, 12, 17].

В последнее время в холодильной технике все чаще начинают применяться вихревые трубы, в которых охлаждение газов основано на эффекте, открытом Ж. Ранком в 1931 г. Этот способ получения низких температур и перспективы его использования подробно рассмотрены в популярной книге А. В. Мартынова и В. М. Бродянского [14], к которой мы и отсылаем читателей, интересующихся вихревым эффектом.

Рассмотренные способы понижения температуры относятся к внутреннему охлаждению рабочего тела. Понижение температуры при их осуществлении вызвано изменением (уменьшением) таких параметров, как, например, давление или напряженность магнитного поля. При этом происходит как бы самоохлаждение рабочего тела.

Понизить температуру рабочего тела можно также отводом от него теплоты к среде, имеющей более низкую температуру. Так, например, осуществляется охлаждение водой сжатого воздуха в холодильниках после компрессора, охлаждение горячих деталей в воде или масле при их закаливании. Однако среды, к которой можно было бы отвести тепловой поток при достаточно низких температурах в естественных наземных условиях, не существует. Выход находят, создавая ее искусственным путем, используя один из методов внутрен-

ный не-  
работлаждения. Так, например, одно из рабочих тел,  
а решившихся внутреннему охлаждению, можно исполь-  
рату для внешнего охлаждения другого рабочего тела.  
Зешнее охлаждение чаще всего реализуется двумя  
тями: каскадным способом понижения температуры  
и регенеративным теплообменом.

## **7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАСКАДНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПРОЦЕССАХ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Достигнуть желаемой низкой температуры, особенно криогенной, обычно непосредственно не удастся ни одним из рассмотренных выше способов, если ее исходное значение находилось на уровне температуры  $T_{o.c}$  окружающей среды. При такой высокой стартовой температуре охлаждение или в принципе невозможно (например, адиабатическое размагничивание, дросселирование газов, обладающих при  $T_{o.c}$  отрицательным дроссель-эффектом), или крайне неэффективно по технико-экономическим соображениям. Так, если бы мы захотели использовать дросселирование для охлаждения водорода или гелия при начальной температуре  $T_{o.c}$ , то получили бы обратный эффект, т. е. нагревание этих газов.

Получение криотемператур при расширении водорода или гелия в детандере от начальной температуры  $T_{o.c}$  теоретически возможно, но неэффективно по технико-экономическим соображениям, поскольку требует высокого исходного давления, трудно реализуемого на практике.

Оказывается, выгодно получать низкие температуры чаще всего путем сочетания внутреннего охлаждения с внешним. Целью внешнего охлаждения в этом случае является понижение начальной температуры рабочего тела перед его внутренним охлаждением.

Внешним охлаждением пользовались еще во времена Лавуазье и Ломоносова, однако по-настоящему широкое применение оно получило благодаря работе швейцарского ученого Р. Пикте.

На заседании французской академии наук в декабре 1877 г. одновременно с результатами работы Кайете по ожижению кислорода было доложено и об успехах Пикте в этой области.

Принципиальная схема двухступенчатого каскадного охлаждения показана на рис. 11. Газ А сжимается в компрессоре 1 и охлаждается при температуре, близкой к  $T_{0.c}$ . Охлаждение до  $T_{0.c}$  обычно осуществляется водой или воздухом. Далее через расширительный вентиль 2 охлажденный газ попадает в сосуд 3, в котором поддерживается более низкое давление, например давление всасывания компрессора 1, и температура жидкости становится ниже  $T_{0.c}$ .

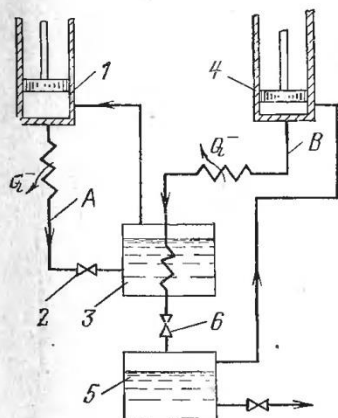


Рис. 12. Схема Линде.

39

ление и соответственно температура жидкости. Таким образом, температура жидкости в сосуде 5 становится ниже, чем в сосуде 3. Для достижения еще более низкой температуры количество ступеней каскадов можно увеличить.

В своих опытах по ожижению кислорода Пикте использовал для предварительного охлаждения сжатого газа двухкаскадную установку, работающую соответственно на сернистом газе и двуокиси углерода.

Позже каскадный метод охлаждения был значительно усовершенствован работами Камерлинг-Оннеса и Дьюара. В частности, используя принцип предварительного каскадного охлаждения, Дьюар в 1898 г. впервые ожижил водород, а Камерлинг-Оннес в 1908 г. впервые ожижил гелий.

Каскадный способ ожижения газов в сочетании с другими способами широко используется и в настоящее время. Его главное преимущество заключается в простоте и надежности. Эта надежность обусловлена отсутствием (в схемах без детандеров) движущихся деталей, работающих при низких температурах.

*Регенеративный теплообмен* занимает особое место в процессах получения низких температур. С его ролью мы уже познакомились при рассмотрении ожижителя Сименса. В этой схеме (см. рис. 7) обратный поток служит для предварительного охлаждения следующих порций газа, поступающих в детандер. Охлаждение производится в противоточном теплообменнике. Таким образом, начальная температура перед расширением газа в детандере (внутренним охлаждением) может быть понижена вплоть до конденсации прямого потока, что и использовал Ж. Клод в одной из своих первых установок.

Используя регенеративный теплообмен, К. Линде, как уже упоминалось, построил в 1895 г. первый промышленный ожижитель воздуха, в котором внутреннее охлаждение осуществлялось дросселированием. Схема этой установки показана на рис. 12. Сжатый до давления 20 МПа в компрессоре 1 воздух охлаждается сначала в холодильнике 2 водой, а затем обратным потоком в теплообменнике 3.

При прохождении через дроссельный вентиль 4 часть потока ожижается и собирается в сборнике 5, откуда через сливной вентиль 6 отводится к потребителю. Не-

ожиженная часть воздуха направляется в теплообменник 3 для охлаждения прямого потока.

Пусковой период осуществляется следующим образом. Первые порции сжатого в компрессоре воздуха поступают на дроссельный клапан при температуре окружающей среды  $T_{oc}$ . В процессе дросселирования температура воздуха понижается. Однако этого понижения еще недостаточно для ожижения воздуха, и поэтому охлажденный поток целиком направляется в теплообменник. Следующие порции воздуха прямого потока, поступающие на дроссельный клапан, будут уже охлаждены в теплообменнике 3 обратным потоком и при дросселировании охладятся до более низкой температуры и т. д.

Охлаждение будет продолжаться до тех пор, пока температура прямого потока не снизится до значения, достаточного для того, чтобы при дросселировании образовывалась парожидкостная смесь. После этого начинается накопление жидкости в сборнике 5.

Сочетанием регенеративного теплообмена с внутренним охлаждением можно технически просто осуществить процесс ожижения любого газа.

Понятно, что регенеративный теплообмен в таких установках был бы невозможен без осуществления внутреннего охлаждения, поскольку не было бы источника холодного потока, понижающего температуру газа, поступающего на ожижение. Но возможности регенеративного теплообмена также ограничены. Дело в том, что сжатый охлаждаемый газ имеет почти всегда более высокую теплоемкость, чем обратный расширенный (охлаждающий) поток<sup>1</sup>.

В процессе теплообмена от охлаждаемого потока отводится количество теплоты, равное

$$Q_{пр} = m_{пр} c_p^{пр} \Delta T_{пр}, \quad (26)$$

где  $m_{пр}$ ,  $c_p^{пр}$  — соответственно масса и теплоемкость прямого потока;  $\Delta T_{пр}$  — изменение температуры прямого потока при прохождении через теплообменник.

Это количество теплоты  $Q_{пр}$  воспринимается обратным потоком, что и приводит к его нагреванию:

$$Q_{обр} = m_{обр} c_p^{обр} \Delta T_{обр}, \quad (27)$$

<sup>1</sup> Исключение составляют рабочие тела при  $T < 3T_{кр}$ .

где  $m_{обр}$ ,  $c_p^{обр}$  — масса и теплоемкость обратного потока;  $\Delta T_{обр}$  — изменение температуры обратного потока при прохождении через теплообменник.

Так как  $Q_{пр} = Q_{обр}$ , можно записать:

$$m_{пр} c_p^{пр} \Delta T_{пр} = m_{обр} c_p^{обр} \Delta T_{обр}. \quad (28)$$

Поскольку для газов, используемых в криогенной технике, как правило,  $c_p^{пр} > c_p^{обр}$ , то из уравнения (28) при равенстве масс прямого и обратного потоков получаем, что  $\Delta T_{пр} < \Delta T_{обр}$ .

Следовательно, выходящий из теплообменника газ прямого потока будет всегда иметь более высокую температуру, чем входящий в него обратный поток. Другими словами, при регенерации прямой поток не достигает той минимальной температуры, которую имеет обратный поток. Неравенство в изменении температур прямого и обратного потоков увеличивается в еще большей степени при ожижении газов. Действительно, в случае ожижения части прямого потока и вывода из системы продукта в виде жидкости через теплообменник пойдет обратным потоком только оставшаяся неожиженная часть. При этом  $m_{обр} < m_{пр}$ , что наряду с неодинаковыми теплоемкостями потоков приведет к еще большим различиям в  $\Delta T$ .

По этим причинам одной регенерации часто бывает недостаточно, чтобы понизить температуру прямого потока до нужного значения перед его расширением

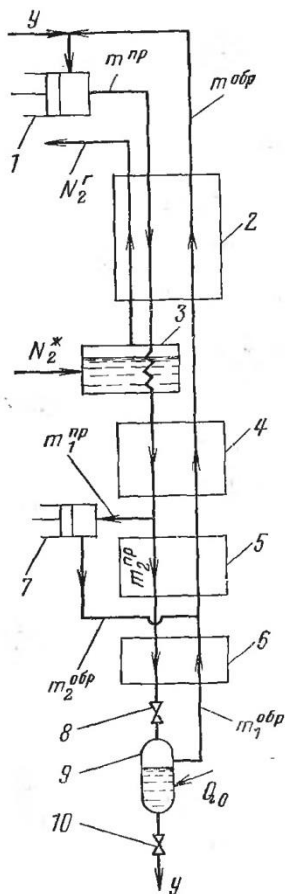


Рис. 13. Схема гелиевого ожижителя.



(внутренним охлаждением). Тогда наряду с регенерацией прибегают к дополнительному (промежуточному) охлаждению прямого потока. Оно производится чаще всего или посторонним источником холода, или расширением и, следовательно, охлаждением части прямого потока с использованием полученного холода для понижения температуры оставшейся части. Необходимо помнить, что посторонний источник холода в свою очередь создается с применением какого-либо способа внутреннего охлаждения.

Наилучшей иллюстрацией применения способов внутреннего и внешнего охлаждения в реальных установках служит принципиальная схема гелиевого ожижителя, предложенная П. Л. Капицей в 1934 г. Эта схема показана на рис. 13. Гелий, сжатый в компрессоре 1, поступает в теплообменник 2, где охлаждается, отдавая теплоту обратным потокам. Дополнительное охлаждение прямого потока производится в аппарате 3, в котором теплота от прямого потока отводится к кипящему жидкому азоту, подаваемому из отдельно расположенной криогенной системы.

В теплообменнике 4 охлаждение прямого потока осуществляется только обратным потоком.

Второе дополнительное охлаждение реализуется в теплообменнике 5, где к обратному потоку  $m_1^{\text{обр}}$  присоединяется масса  $m_2^{\text{ср}}$ , отведенная через детандер 7 из прямого потока. При расширении газа в детандере происходит его внутреннее охлаждение, и потоки  $m_2^{\text{ср}}$  и  $m_1^{\text{обр}}$  соединяются перед поступлением в теплообменник 5. В этом теплообменнике благодаря отводу части прямого потока на детандер достигается превышение массы обратного потока над прямым. Это компенсирует большую  $c_p^{\text{пр}}$ , и, следовательно, можно получить в теплообменнике 5  $\Delta T_{\text{пр}} > \Delta T_{\text{обр}}$ . Таким образом, используя внутреннее охлаждение части  $m_1^{\text{пр}}$  газа, в детандере удается получить холод, используемый для дополнительного понижения температуры оставшейся части прямого потока.

Дальнейшее внешнее охлаждение прямого потока происходит в теплообменнике 6. После этого теплообменника через вентиль 8 гелий поступает на дросселирование, в процессе которого происходит его дальнейшее

(теперь внутреннее) охлаждение и частичная конденсация.

Жидкость в количестве  $y$  отводится из сборника 9 через сливной вентиль 10; отведенная масса гелия компрессируется дополнительной подачей такого же количества газа на всасывание в компрессор. Так осуществляется ожижение гелия. Существуют и более сложные схемы, но принципы понижения температуры рабочего тела остаются одинаковыми.

По такому же принципу работают и низкотемпературные *рефрижераторы* — установки, предназначенные для отвода теплоты от охлаждаемого или термостатируемого объекта. Их основное отличие от ожижителей заключается в том, что в рефрижераторах нет вывода из системы сконденсированного газа. Следовательно, в рефрижераторах массы прямого и обратного потоков равны, благодаря чему достигается более эффективное охлаждение прямого потока.

Теоретически для того, чтобы превратить ожижитель в рефрижератор, достаточно прекратить слив сконденсированного газа, а к сборнику жидкости подвести тепловой поток  $Q_0$  от охлаждаемого или термостатируемого объекта (см. рис. 13). Конечно, реальная установка при таком переводе с одного режима на другой требует соответствующего регулирования.

В некоторых рефрижераторах рабочее тело вообще не доводят до конденсированного состояния, а отвод теплоты осуществляют охлажденным газом. Примером такого рефрижератора может служить оригинальная установка, работающая по обратному циклу Стирлинга [1, 13, 17].

На практике часто используют универсальные установки — ожижители-рефрижераторы. Такое комбинирование существенно расширяет возможности использования криогенных установок.

## **8. РАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ**

Особое место занимают установки для разделения газовых смесей методом низкотемпературной ректификации. В них сочетаются различные способы получения низких температур непосредственно с ректификацией (разделением).

Разделение основано на использовании различия в температурах кипения компонентов, входящих в смесь. Поэтому перед разделением смесь должна быть ожижена. Однако в реальных установках часто процессы ожижения и разделения осуществляются одновременно, так что бывает невозможно выделить тот или иной процесс в «чистом» виде.

Низкотемпературная ректификация в принципе не отличается от высокотемпературной. Последовательное испарение и конденсация с соответствующим отводом продуктов разделения приводят в итоге к разделению относительно легкокипящих (имеющих более низкую температуру кипения) компонентов от тяжелокипящих (кипящих при более высокой температуре).

Для осуществления процесса ректификации необходим как подвод теплового потока (в процессе испарения), так и отвод (в процессе конденсации). В этом смысле имеется существенная разница в проведении низкотемпературной и высокотемпературной ректификации.

Если при температурах выше  $T_{0.c}$  осуществить испарение смеси сравнительно легко и просто подводом теплоты, например паровым или электрообогревом и т. д., а отвести теплоту (при конденсации) в окружающую среду также не представляет труда, то при  $T < T_{0.c}$  для этих целей необходимо прибегать к специальным приемам, сочетать ректификацию с низкотемпературными циклами. Поскольку получение и поддержание низких температур обходится сравнительно дорого, то при низкотемпературной ректификации предъявляются повышенные требования к рациональному использованию тепловых потоков.

Примером сочетания различных способов получения низких температур и разделения газовой смеси может служить воздухоразделительная установка, принципиальная схема которой показана на рис. 14.

Воздух, сжатый в компрессоре 1 и очищенный от примесей в аппарате 2, поступает в теплообменник 3, где охлаждается обратными потоками продуктов разделения. После теплообменника 3 поток воздуха делится на две части: одна поступает в детандер 4, а вторая — в теплообменник 5. Благодаря отводу части прямого потока на детандер в «теплой зоне» теплообменника 5 идет охлаждение оставшейся части до более низкой температуры, чем это было бы в случае прохождения через

эту зону всего количества воздуха. Включением детандера достигается тот же эффект, что и в рассмотренном выше ожижителе гелия, т. е. достигается превышение массы обратных потоков над прямым. Однако в случае воздухоразделительной установки направлять холодный воздух после детандера в обратный поток целесообразнее только после его разделения на компоненты. Строго говоря, в этом случае в обратный поток направляется не воздух, а продукты его разделения, и таким образом в установке реализуется холод, полученный в детандере.

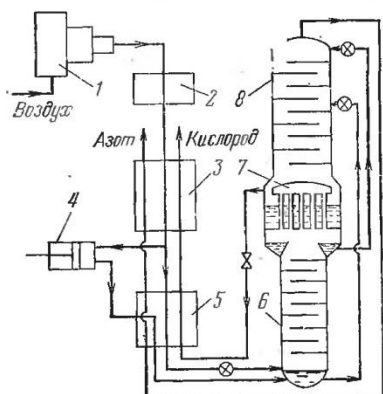


Рис. 14. Схема воздухоразделительной установки.

После детандера расширенный воздух доохлаждается в «холодной» зоне теплообменника 5 и вместе с другой частью поступает в нижнюю ректификационную колонну 6, причем поток, имеющий более высокое давление, дросселируется и частично охлаждается. Для простоты рассмотрения процесса разделения воздуха примем, что он состоит из двух компонентов — азота и кислорода.

При атмосферном давлении температура кипения азота примерно на 13 К ниже, чем у кислорода (см. табл. 1), и поэтому азот будет легкокипящим по сравнению с кислородом газом. Поднимаясь по колонне 6 вверх, пар последовательно барботирует через слои жидкости, находящейся на тарелках. В результате тепломассообмена поднимающийся пар постепенно обогащается легкокипящим компонентом — азотом. Жидкость, стекающая с вышележащих тарелок на нижележащие, обогащается в результате контакта с паром тяжелокипящим компонентом — кислородом. Таким образом, концентрация легкокипящего компонента в паре по мере движения вверх увеличивается, а его температура уменьшается; температура стекающей вниз жидкости увеличивается.

В конденсаторе 7 происходит конденсация пара

легкокипящего компонента и жидкость частично сливается снова в колонну 6, а частично подается на орошение верхней колонны. Так в нижней колонне происходит частичное разделение воздуха на азот, используемый в дальнейшем для осуществления процесса ректификации в нижней и верхней колоннах, и обогащенный кислородом воздух. Этот воздух в жидком виде собирается в нижней части (в кубе) нижней колонны и затем подается на разделение в верхнюю колонну.

В верхней колонне 8 происходит дальнейшее разделение обогащенного кислородом воздуха на азот и кислород. Жидкий кислород, стекающий с нижней тарелки в межтрубное пространство конденсатора, используется для отвода теплоты от конденсирующегося азота. В результате кислород испаряется и частично поступает в верхнюю колонну для осуществления процесса ректификации, а частично выводится из колонны в виде продукта. Окончательно продукты разделения отводятся в газообразном виде и поступают обратным потоком в теплообменные аппараты 5 и 3 для охлаждения прямого потока.

Процесс низкотемпературной ректификации построен так, что испарение и конденсация осуществляются с использованием внутренних тепловых потоков. Для осуществления этого процесса не требуется дополнительных внешних источников теплоты или охлаждения. Так, конденсатор нижней колонны служит одновременно испарителем для верхней. Для отвода теплоты при конденсации легкокипящего компонента (азота) тяжелокипящим (кислородом) необходимо, чтобы кислород имел более низкую температуру, чем азот. Известно, что температура конденсации (кипения) зависит от давления. Поэтому, чтобы сконденсировать азот кипящим кислородом, в колоннах поддерживают различные давления.

Для установки, показанной на рис. 14, давление в нижней колонне должно быть больше, чем в верхней. Так как разность температур между конденсирующимся азотом и кипящим кислородом поддерживают в пределах 1,5—2,5 К, то давление в верхней колонне устанавливают меньше, чем в нижней, на 0,3—0,4 МПа. Обычно давление в верхней колонне воздухоразделительных установок составляет около 0,13 МПа, а в нижней — соответственно 0,5—0,6 МПа.

Мы рассмотрели процесс низкотемпературной ректификации на примере сравнительно простой схемы. По такой схеме делаются воздухоразделительные установки среднего давления (до 4 МПа) и небольшой производительности. Для крупных установок применяются более сложные схемы низкого давления.

## ГЛАВА ВТОРАЯ

# ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИКИ ПОЛУЧЕНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

## 9. ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Область низких температур имеет две характерные особенности.

Первая из них состоит в том, что эта область сравнительно невелика по температурному интервалу — от температуры окружающей среды до абсолютного нуля, т. е. всего около 300 К.

В связи с этим на первый взгляд может показаться, что достижение любой температуры в этом интервале не представляет труда. Ведь получают же в энергетике температуры, отличающиеся от  $T_{0,c}$  на сотни тысяч или даже миллионы градусов, и это не вызывает удивления. Однако достигнуть абсолютного нуля температуры, т. е. понизить ее от  $T_{0,c}=300$  К до  $T=0$  К, оказывается в принципе невозможным<sup>1</sup>. В этом и заключается вторая особенность области низких температур. По мере приближения к абсолютному нулю, как будет показано ниже, резко возрастает работа, затрачиваемая на отвод единицы количества теплоты. В пределе при  $T \rightarrow 0$  К затрата работы  $l \rightarrow \infty$ .

Таким образом, область низких температур, с одной стороны, характеризуется сравнительно узким диапазоном температур, а с другой — чрезвычайно широким диапазоном изменения работы, затрачиваемой на их достижение.

Известно, что самопроизвольная передача теплоты происходит только в одном направлении: от тел с более высокой температурой к телам с меньшей температурой.

<sup>1</sup> Строгое доказательство недостижимости абсолютного нуля температуры приводится в термодинамике.

Поэтому охладить любое нагретое тело до температуры окружающей среды не представляет труда; процесс охлаждения будет происходить самопроизвольно.

Другая задача возникнет, если потребуется снизить температуру этого же тела до значений  $T$ , меньших, чем  $T_{0.c}$ . Самопроизвольный процесс передачи теплоты в этом случае невозможен, поэтому, чтобы отвести теплоту от охлаждаемого тела в окружающую среду, необходимо затратить работу. По мере снижения температуры охлаждаемого тела будут увеличиваться затраты работы для отвода одинакового количества теплоты. То же самое относится к термостатированию, когда какой-либо объект требуется поддерживать при постоянной температуре  $T_0 < T_{0.c}$ . Термостатирование при  $T_0 < 120\text{ K}$  называется *криостатированием*. Этим термином мы в дальнейшем будем широко пользоваться. Вследствие того, что температура объекта  $T_0 < T_{0.c}$ , отвод теплоты от термостатируемого объекта можно осуществить только с затратой работы.

Для осуществления охлаждения или термостатирования используют электрическую, механическую или другую энергию. Однако не всякая энергия пригодна для этих целей. Так, не удастся использовать для этих, как, впрочем, и для других целей, огромную внутреннюю энергию окружающей среды, что легко можно показать на следующем примере.

Чтобы охладить газ путем дросселирования или расширения в детандере, необходимо предварительно его сжать. Пусть сжатие происходит в поршневом компрессоре, а рабочим телом является воздух при начальном давлении и температуре окружающей среды. Сжатие можно осуществить двумя путями: перемещением поршня или повышением температуры воздуха в цилиндре. В первом случае потребуется приложить к поршню извне более высокое давление, чем исходное в цилиндре (давление окружающей среды); во втором — иметь источник теплоты с температурой более высокой, чем  $T_{0.c}$ . Ни тем, ни другим окружающая среда не располагает. Таким образом, для технического использования пригодна не всякая энергия, а только та, которая при заданных условиях окружающей среды может быть частично или полностью превращена в другие виды энергии. Так, например, энергия теплового потока при  $T > T_{0.c}$  может быть превращена в другие виды энергии

только частично; механическая или электрическая энергия может быть в идеальном случае превращена в другие виды энергии полностью.

Энергию, теоретически превратимую (при заданных условиях окружающей среды) в другие виды, принято называть *эксергией*.

В отношении механической, электрической и некоторых других видов энергии, которые в пределе полностью могут быть превращены в другие виды, понятия «энергия» и «эксергия» тождественны. Применительно к тепловому потоку, внутренней энергии и т. д. такой тождественности нет.

Говорить в общем случае о затрате энергии было бы неверно, потому что энергия не исчезает, а преобразуется в другие ее виды. Только эксергия может быть затрачена (а не только преобразована в другие виды энергии) вплоть до полного рассеивания ее в окружающую среду.

Таким образом, для получения или поддержания низких температур необходимо затрачивать определенное количество эксергии. Эта эксергия в итоге тратится на отвод теплоты от охлаждаемого или термостатируемого тела в окружающую среду.

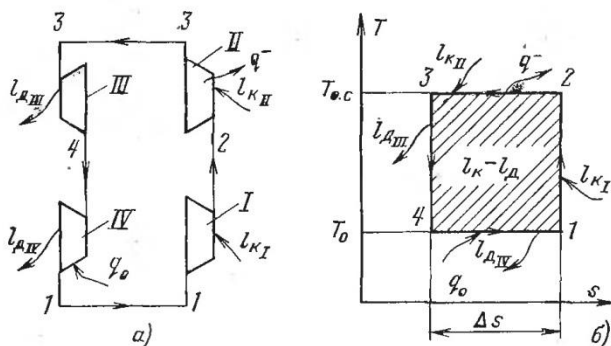


Рис. 15. Рефрижератор, работающий по обратному циклу Карно.  
а — схема установки; б — изображение процесса в  $T, s$ -координатах.

Взаимосвязь между количеством отведенной теплоты  $q_0$  и работой  $l$  можно легко установить при рассмотрении рефрижератора, работающего по обратному циклу Карно. Этот цикл в ряде случаев не является наилучшим



с точки зрения его реализации для технического использования, однако на его основе легко проследить основные закономерности работы рефрижераторов.

Принципиальная схема установки и изображение процессов идеального обратного цикла Карно показаны на рис. 15.

Рабочее тело сжимается сначала в адиабатном компрессоре I от состояния, обозначенного на  $T, s$ -диаграмме точкой 1, до состояния в точке 2. В процессе 1-2 подводится работа  $l_{KI}$ . Далее сжатие происходит в компрессоре II при постоянной температуре  $T_{0.в}$ . При этом от рабочего тела отводится в окружающую среду тепловой поток  $q^-$ . Затем в адиабатном детандере III рабочее тело расширяется от состояния, обозначенного точкой 3, до состояния в точке 4, и его температура понижается от  $T_{0.с}$  до  $T_0$ .

Дальнейшее расширение происходит в изотермическом детандере IV. Оно сопровождается подводом теплоты  $q_0$  от охлаждаемого или термостатируемого объекта.

Взаимосвязь между количеством подведенной извне работы и тепловым потоком, отведенным от термостатируемого объекта, можно установить из энергетического баланса схемы (рис. 15); теплопритоком из окружающей среды в зону низких температур пренебрегаем:

$$q_0 + l_{KI} + l_{KII} = q^- + l_{dIII} + l_{dIV}. \quad (29)$$

Обозначив суммарно затраченную в обоих компрессорах работу через  $l_K$ , а работу, соответственно полученную в детандерах, через  $l_d$ , получим:

$$q_0 + l_{мин} = q^-, \quad (30)$$

где  $l_{мин} = l_K - l_d$ .

Из уравнения (30) следует, что для отвода теплоты  $q_0$  от термостатируемого объекта и передачи ее на температурный уровень окружающей среды необходимо затратить минимальную работу, равную  $l_{мин}$ .

Суммарно подведенная в виде работы  $l_{мин}$  и теплового потока  $q_0$  энергия передается окружающей среде как тепловой поток  $q^-$ .

Найдем отношение количества отведенной от криостатируемого объекта теплоты к затраченной для этой цели

минимальной работе:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_{\text{мин}}} = \frac{T_0 \Delta s}{(T_0 - T_{0,c}) \Delta s} = \frac{T_0}{T_0 - T_{0,c}}. \quad (31)$$

Величина  $\varepsilon$  называется *холодильным коэффициентом* и иногда используется для оценки энергетической эффективности установок. Как видно из (31), для идеального обратного цикла Карно значение  $\varepsilon$  зависит только от температур криостатирования и окружающей среды. Коэффициентом  $\varepsilon$  можно пользоваться для сопоставления энергетической эффективности установок только в том случае, если они работают при одинаковых значениях  $T_{0,c}$  и  $T_0$ . Если этого условия не соблюдать, то из (31) легко можно увидеть, что при постоянном  $T_{0,c}$  с ростом  $T_0$  увеличивается и  $\varepsilon$  независимо от технического совершенства установки. Следовательно, холодильный коэффициент непригоден для сопоставления энергетической эффективности установок, работающих на различных температурных уровнях. В таких случаях оценку совершенства установок проводят по *эксергетическому* к. п. д.  $\eta_e$ , который определяется в общем случае отношением полученной эксергии к затраченной [5]:

$$\eta_e = \frac{\Sigma E^+}{\Sigma E^-}. \quad (32)$$

Применительно к рассмотренному нами циклу полученная эксергия есть не что иное, как эксергия теплового потока  $q_0$  при температуре  $T_0$ , отведенного от термостатируемого объекта, или, другими словами, холод  $q_0$ , сообщенный термостатируемому объекту при температуре  $T_0$ .

В идеальном обратном цикле Карно полученная эксергия точно равна затраченной работе, поскольку никаких потерь подведенной работы (эксергии) нет. Следовательно, полученная эксергия может быть выражена из уравнения (31) через минимальную работу:

$$l_{\text{мин}} = q_0 \frac{T_0 - T_{0,c}}{T_0}. \quad (33)$$

Правая часть уравнения (33) представляет собой полученную эксергию  $\Sigma E^+$ , левая — затраченную  $\Sigma E^-$ . Тогда в соответствии с (32)  $\eta_e$  для цикла Карно равно единице, т. е. предельному значению к. п. д.

Из уравнения (33) следует, что коэффициент  $(T_0 - T_{0,c})/T_0$  представляет собой минимальную работу

для отвода единицы теплоты с температурного уровня  $T_0$  на уровень окружающей среды. Следовательно, чем ниже  $T_0$ , тем больше при прочих равных условиях необходимо затратить работы для отвода одинакового количества теплоты. Покажем это на следующем простом примере. Пусть требуется отвести 1 Вт теплоты на температурном уровне  $T_0=100$  К; температура окружающей среды  $T_{0,c}=300$  К. Для этого необходимо затратить в соответствии с уравнением (33) работу, равную

$$l_{\text{мин}} = 1 \left| \frac{100 - 300}{100} \right| = 2 \text{ Вт.} \quad (34)$$

Величину  $(T_0 - T_{0,c})/T_0$  берут по модулю для того, чтобы затрачиваемая работа не получалась со знаком минус. В данном случае минус дроби  $(T_0 - T_{0,c})/T_0$  означает, что работа для отвода теплоты  $q_0$  затрачивается.

Если  $T_0$  понизить до 10 К, то затрата работы для отвода такого же количества теплоты возрастает до 29 Вт; при снижении  $T_0$  до 0,5 К работа соответственно возрастет примерно до 600 Вт и т. д.

На рис. 16 приведен график зависимости минимальной работы от температурного уровня  $T_0$  при отводе  $q_0=1$  Вт. Из графика видно ее возрастание по мере приближения к абсолютному нулю.

В реальных установках из-за теплопритока, гидравлических, электро-механических и других видов потерь затрачивается значительно больше работы, чем это следует из рис. 16. Выражение для реальной работы имеет следующий вид:

$$l_p = \frac{l_{\text{мин}}}{\eta_{el}} = \frac{q_0 \frac{T_0 - T_{0,c}}{T_0}}{\eta_e}, \quad (35)$$

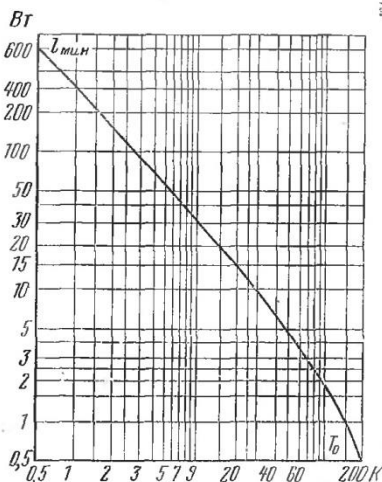


Рис. 16. График зависимости минимальной работы при отводе 1 Вт теплоты от температурного уровня  $T_0$ .

где  $l_p$  — удельная работа, затрачиваемая в реальной установке;  $\eta_e$  — эксергетический к. п. д. установки.

Удельная реальная работа существенно зависит и от масштаба установки. Обычно чем крупнее установка тем меньше относительная величина потерь и соответственно выше  $\eta_e$ .

При одинаковых  $q_0$  и  $T_0$  различных установок значение  $\eta_e$  может существенно отличаться из-за неодинаковой эффективности технологических схем, различного совершенства оборудования и качества изоляции.

Если высококачественную изоляцию в современных условиях выполнить сравнительно легко, то создать надежно работающую установку, особенно криогенную, удастся далеко не всегда. Обычно, чем термодинамически совершеннее установка, тем сложнее ее схема и конструктивное исполнение и тем дороже ее изготовление. Поэтому на практике при создании низкотемпературных установок часто приходится принимать компромиссное решение.

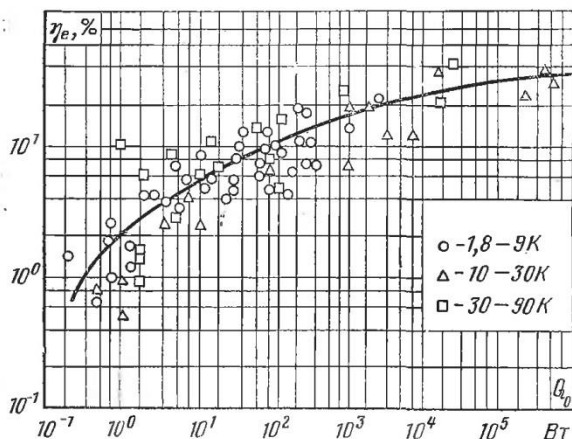


Рис. 17. Зависимость эксергетического к. п. д. рефрижераторов от холодопроизводительности при различных  $T_0$ .

На рис. 17 показана зависимость эксергетического к. п. д. некоторых реальных рефрижераторов от  $q_0$  при различных  $T_0$ . Из рис. 17 видно, что наиболее сильно зависимость  $\eta_e$  от  $q_0$  проявляется в области холодопроизводительностей ниже 100 Вт. Влияние температурного уровня  $T_0$  на  $\eta_e$  проявляется значительно слабее. Но все

же можно проследить явную тенденцию уменьшения  $\eta_e$  с понижением  $T_0$ . Это объясняется тем, что с понижением  $T_0$  возрастает термодинамическая ценность потерянного холода, т. е. для компенсации потери  $q_0$  вследствие теплопритоков, гидравлических сопротивлений и т. д. приходится затрачивать возрастающую (с понижением  $T_0$ ) работу.

Энергетические показатели рефрижераторов оказывают существенное влияние на их общую технико-экономическую характеристику. В качестве примера рассмотрим, как изменяется стоимость отвода  $q_0=1$  кВт теплоты с температурного уровня  $T_0=100$  К в зависимости от масштаба установки.

В идеальном случае расход энергии в соответствии с уравнением (34) составит 2 кВт и при тарифе на электроэнергию, например, 1,4 коп/(кВт·ч) стоимость отвода  $q_0$  будет равна  $2 \times 1,4 = 2,8$  коп/ч. В реальном случае при отводе того же количества теплоты с помощью установки, например, холодопроизводительностью  $10^5$  Вт затраты будут в 4 раза больше, чем в идеальном случае (см. рис. 17), и стоимость отвода соответственно составит 11,2 коп/ч. Если отвод теплоты осуществлять небольшими установками холодопроизводительностью по 100 Вт, то стоимость отвода 2 кВт будет соответственно равна 28 коп/ч и т. д. Таким образом, масштаб установки существенно влияет на стоимость термостатирования.

## 10. ОЖИЖЕНИЕ ГАЗОВ

Чтобы перевести газ в конденсированное, например жидкое, состояние, необходимо отвести от него определенное количество теплоты, которое зависит от теплотфизических свойств конденсируемого вещества и его начальных параметров.

В общем случае процесс ожижения состоит из двух стадий: охлаждения газа от исходного состояния до температуры конденсации и непосредственной конденсации. Первая из них протекает при переменной температуре, вторая — при постоянной. Тепловой поток отводится, естественно, в обеих стадиях.

Если температура  $T_k$  конденсации вещества ниже  $T_{0,с.}$ , то самопроизвольный отвод теплоты, как мы знаем, исключен. В этом случае теплота отводится теми же приемами, что и при термостатировании, с затратой работы.

Наиболее наглядно процесс ожижения можно проследить по  $T, s$ -диаграмме ожижаемого газа (рис. 18).

Рис. 18. Изображение идеальных процессов ожигения в  $T, s$ -диаграмме.

После достижения температуры конденсации  $T_K = T_2$  дальнейший отвод теплоты можно осуществить с помощью обратного цикла Карно  $2'-3'-3-2-2'$ . В результате получим жидкость в состоянии 3 при  $T_K$  и  $p_{o.c.}$

Используя уравнение (33), определяем минимальную работу для охлаждения газа от состояния 1 до состояния 2. С помощью каждого из бесконечно большого числа циклов Карно от охлаждаемого газа на переменном температурном уровне отводится бесконечно малое количество теплоты  $\delta q$ . Тогда суммарно затраченная работа будет равна:

$$l_{1-2} = \sum_{n=1}^{\infty} \delta q_{\text{окл}} \frac{T - T_{\text{о.с.}}}{T}, \quad (36)$$

где  $\delta q_{\text{охл}}$  — тепловой поток, отводимый от охлаждаемого газа с помощью обратного цикла Карно на температурном уровне  $T$ .

Преобразование уравнения (36) приводит к следующему окончательному выражению:

$$l_{1,2} = i_1 - i_2 - T_{\text{о.с}}(s_1 - s_2), \quad (37)$$

где  $i_1, i_2, s_1, s_2$  — соответственно энтальпии и энтропии газа в состояниях 1 и 2.

Работа, затрачиваемая для отвода теплоты при конденсации газа, определяется аналогично (33) из следующего уравнения:

$$l_{2,3} = q_k \frac{T_k - T_{\text{о.с}}}{T_k}, \quad (38)$$

где  $q_k$  — теплота конденсации вещества, определяемая непосредственно из диаграммы или по справочным данным.

После преобразования (38) получим:

$$l_{2,3} = i_2 - i_3 - T_{\text{о.с}}(s_2 - s_3). \quad (39)$$

Тогда суммарная идеальная работа, затрачиваемая на ожижение газа, будет равна:

$$l_{\text{ид}} = l_{1,2} + l_{2,3} = i_1 - i_3 - T_{\text{о.с}}(s_1 - s_3). \quad (40)$$

Эта работа равна разности эксергий ожижаемого газа соответственно в состояниях 1 и 3. Следовательно, для того чтобы найти минимальную работу ожижения, достаточно знать эксергии газа в исходном и конечном состояниях. Эти значения легко определяются из диаграмм состояния веществ или по табличным данным как непосредственно, так и через другие термодинамические параметры (например, через  $i$  и  $s$ ).

В реальных случаях работа, затрачиваемая на ожижение, значительно больше, чем  $l_{\text{ид}}$ , определяемая по (40). Дополнительная затрата работы связана с отводом теплоты, поступающей из окружающей среды в низкотемпературную область установки, с преодолением сопротивлений потокам газа и жидкости и т. д. В зна-

чительной мере реальная затрата работы зависит от совершенства технологической схемы и масштаба установки. Обычно реальная работа превышает идеальную для криогенных установок примерно в 5—10 раз.

Эксергетический к. п. д. охладителя определяется из уравнения

$$\eta_e = l_{ид}/l_p, \quad (41)$$

где  $l_p$  — реально затраченная работа.

Чем совершеннее реальная установка, тем выше и ее эксергетический к. п. д.

В табл. 2 приведена идеальная и реальная работа охижения некоторых газов, наиболее распространенных в криогенной технике. Из таблицы видно, что эксергетический к. п. д. практически всех криогенных охладителей имеет сравнительно небольшое значение. В настоящее время ведутся интенсивные работы по исследованию и совершенствованию криогенных установок с целью увеличения их термодинамической эффективности и повышения надежности работы.

Таблица 2 Идеальная и реальная работа охижения некоторых газов при начальных параметрах  $T_{0,c}=300\text{ К}$  и  $p_{0,c}=1,01 \cdot 10^5\text{ Па}$  [13]

| Газ      | Общая теплота, отводимая при охижения $\Delta i$ , Дж/моль | Теплота конденсации $q_k$ , Дж/моль | $l_{ид}$ , кВт·ч/кг | Примерная действительная затрата работы, кВт·ч/кг | Эксергетический к. п. д. $\eta_e$ , % |
|----------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Азот     | 12 130                                                     | 5560                                | 0,22                | 1,2—1,8                                           | 15—20                                 |
| Аргон    | 10 980                                                     | 6450                                | 0,134               | 0,8—1,0                                           | 15—20                                 |
| Водород  | 7960                                                       | 890                                 | 3,31                | 22—42                                             | 8—15                                  |
| Воздух   | 12 388                                                     | 5942                                | 0,205               | 1,2—1,8                                           | 15—20                                 |
| Гелий    | 6250                                                       | 81,3                                | 1,9                 | 16—32                                             | 7—10                                  |
| Кислород | 13 000                                                     | 6800                                | 0,177               | 1,0—1,5                                           | 15—20                                 |
| Метан    | 14 660                                                     | 8200                                | 0,307               | 0,6—1,0                                           | 30—50                                 |
| Неон     | 7425                                                       | 1735                                | 0,37                | 3,5—5,5                                           | ~10                                   |

С этой точки зрения большой интерес представляет, в частности, использование газовых смесей, а также детандеров, работающих в двухфазной (жидкость — пар) области. К обсуждению этих вопросов мы вернемся в гл. 4.

Используя табл. 2, нетрудно определить, во что обходится охижение газов в денежном выражении. Так, например, при тарифе на электроэнергию 1,4 коп/(кВт·ч)



стоимость ожижения 1 кг гелия (получения 0,8 л жидкого гелия) с учетом только энергетических затрат составит в идеальном случае 2,7 коп.; в реальном случае стоимость ожижения будет значительно больше и составит 22,5—44,8 коп. Следовательно, дальнейшее совершенствование ожижителей с целью уменьшения энергетических затрат является актуальной задачей техники низких температур.

## 11. РАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Разделение газовой смеси на компоненты или выделение из нее одного или нескольких компонентов требует также затраты работы.

В общем случае минимальная работа разделения газовой смеси представляет собой сумму минимальных работ сжатия компонентов от их парциальных давлений в смеси до давления смеси. Поясним это на следующем примере.

Пусть газовая смесь  $M$ , состоящая из компонентов  $A, B, C$ , поступает в разделительную установку  $PU$  (рис. 19). В результате разделения компоненты выходят при температуре поступающей смеси и имеют давление, равное давлению смеси.

До разделения компоненты поступали в установку одним потоком, давление которого было равно сумме парциальных давлений компонентов

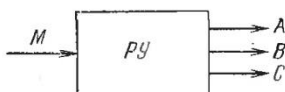


Рис. 19. Схема потоков веществ при разделении газовых смесей.

$$p_{\text{см}} = \sum p_i. \quad (42)$$

Отсюда получаем минимальную работу разделения, равную сумме изотермических работ сжатия компонентов:

$$l_{\text{разд}} = AR_A T_{\text{см}} \ln \frac{p_{\text{см}}}{p_A} + BR_B T_{\text{см}} \ln \frac{p_{\text{см}}}{p_B} + CR_C T_{\text{см}} \ln \frac{p_{\text{см}}}{p_C}. \quad (43)$$

При выделении только одного компонента из смеси требуется также сжимать разделяемые потоки до исходного давления смеси. Так, если выделять только компо-

нент  $B$  из смеси, минимальная работа его выделения составит:

$$l_{\text{выд}} = BR_B T_{\text{см}} \ln \frac{p_{\text{см}}}{p_B} + (A + C) R_{\text{AC}} T_{\text{см}} \ln \frac{p_{\text{см}}}{p_A + p_C}. \quad (44)$$

Интересно отметить, что применительно к воздуху работа выделения запишется по-иному.

Мы знаем, что атмосферный воздух является сырьем для получения таких газов, как азот, кислород, аргон и др. Воздушный океан бесконечно велик по запасу воздуха по сравнению с теми его количествами, которые перерабатываются в установках. Поэтому в результате извлечения на какой-либо конкретной установке, например, азота или кислорода давление окружающей среды в целом не изменится, и, следовательно, атмосферный воздух не требуется дожимать до первоначального состояния.

В этом случае выделение какого-либо компонента ( $O_2$ ,  $N_2$  и т. д.) требует затраты работы только для его сжатия от парциального давления до давления атмосферы. Например, минимальная работа выделения кислорода равна:

$$l_{\text{выд } O_2} = 0,21 R_{O_2} T_{\text{о.с.}} \ln \frac{1}{p_{O_2}} = 0,21 R_{O_2} T_{\text{о.с.}} \ln \frac{1}{0,21}, \quad (45)$$

где 0,21 — мольная доля кислорода в воздухе.

Большинство широко используемых газов получают разделением газовых смесей методом низкотемпературной ректификации. Для осуществления этого процесса совмещают, как было показано в гл. I, получение низких температур непосредственно с ректификацией. При этом, естественно, происходит суммирование в реальных случаях потерь, присущих как низкотемпературным процессам, так и ректификации.

В итоге реальная работа  $l_p$ , затрачиваемая на разделение газовой смеси, во много раз превышает идеальную.

Эксергетический к. п. д. реальной установки подсчитывается по уравнению

$$\eta_{\text{е.разд}} = \frac{l_{\text{ид}}}{l_p}. \quad (46)$$

Для воздухоразделительных установок  $\eta_{\text{е.разд}}$  составляет 9—22%.

Распределение потерь при разделении газовой смеси, %, методом низкотемпературной ректификации показано

на примере современной крупной воздуходелительной установки низкого давления [13]:

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Необратимость сжатия в компрессоре . . . . .                           | 40  |
| Необратимость процесса разделения в ректификационной колонне . . . . . | 16  |
| Необратимость теплообменной аппаратуры . . . . .                       | 21  |
| Потери вследствие теплопритоков . . . . .                              | 3   |
| Необратимость при расширении в дроссельных вентилях . . . . .          | 2   |
| Необратимость при расширении в турбодетандерах . . . . .               | 3   |
| Минимальная работа разделения . . . . .                                | 15  |
| Итого . . . . .                                                        | 100 |

Как видно из приведенных данных, основная затрата работы (70%) связана не с ректификацией, а с обеспечением низких температур для ее проведения. Несмотря на сравнительно большие потери, метод низкотемпературной ректификации остается пока самым экономичным из всех известных методов разделения газовых смесей.

Таблица 3 Себестоимость продуктов разделения, получаемых в установке типа Кт-12-3 [23]

| Наименование продукта          | Составляющие себестоимости, % |       |       |         |          | Полная себестоимость, руб/м³ |
|--------------------------------|-------------------------------|-------|-------|---------|----------|------------------------------|
|                                | $S_э$                         | $S_a$ | $S_з$ | $S_{ц}$ | $S_{оз}$ |                              |
| Кислород технологический (95%) | 64,9                          | 11,0  | 2,7   | 12,3    | 9,1      | 1,09                         |
| Кислород технический (99,5%)   | 58,9                          | 18,3  | 2,4   | 11,3    | 9,1      | 2,63                         |
| Азот                           | 65,0                          | 11,4  | 2,7   | 12,3    | 8,6      | 0,71                         |
| Криптоно-ксеноновый концентрат | 57,5                          | 18,4  | 2,3   | 10,8    | 11,0     | 109,0*                       |

\* Себестоимость и ее составляющие для криптоно-ксеноновой смеси пересчитаны на 10%-ую смесь (Кт+Хе) и выражены в руб/м³.

Примечание.  $S_э$ ,  $S_a$ ,  $S_з$ ,  $S_{ц}$ ,  $S_{оз}$  — соответственно затраты энергетические, амортизационные, на зарплату, цеховые, общезаводские.

Себестоимость продуктов разделения газовых смесей зависит, как известно, не только от затраченной работы, но и от других, неэнергетических затрат: отчисления на амортизацию оборудования, зарплаты производственного персонала и т. д. Однако доля энергетической составляющей в общей сумме затрат, как и для крупной низкотемпературной установки любого назначения, превышает в этом случае 50%.

В табл. 3 даны примерные соотношения в различных затратах при комплексном разделении воздуха в крупной установке типа Кт-12-3.

Приведенные в табл. 3 значения различного вида затрат могут в зависимости от конкретных условий изменяться в ту или иную сторону, но доля энергозатрат во всех случаях будет преобладающей.

## **12. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК**

Характеристика любой низкотемпературной установки по эксергетическому к. п. д. является весьма важной, но не достаточно полной, поскольку  $\eta_e$  учитывает только энергетические затраты.

Кроме того, как известно, существуют капитальные затраты, связанные со стоимостью материалов, изготовления и монтажа установки. В расчет необходимо принимать также и стоимость обслуживания. Такая многоплановость факторов, влияющих на общую оценку эффективности использования той или иной низкотемпературной установки, учитывается на стадии технико-экономической оптимизации. При этом, естественно, учитываются затраты всех видов.

В процессе технико-экономического анализа на первом этапе выбираются главные, определяющие эффективность факторы и производится их сопоставление. Учет второстепенных факторов может быть сделан после выбора окончательного варианта системы.

Применительно к низкотемпературным установкам главными (конкурирующими) факторами являются энергетические и капитальные затраты.

Так, для установок микрокриогенной техники подавляющее значение имеют капитальные затраты. Как правило, такие установки изготавливаются небольшими партиями, уникальны по конструкции, требуют больших трудозатрат при изготовлении, вследствие чего себестоимость их сравнительно высока. Энергозатраты при эксплуатации таких установок незначительны.

Для крупных ожижительных, рефрижераторных и разделительных установок энергетическая статья расходов составляет не менее 50% в общей сумме затрат.

Качественно ход технико-экономической оптимизации можно проследить на следующем примере (рис. 20). Пусть оптимизация криогенного рефрижератора проводится по двум критериям: энергетическим и капитальным затратам.

Стремление снизить энергетические затраты  $Z_э$  приводит, в частности, к необходимости уменьшения потерь от необратимости в теплообменниках криоблока установки. Снизить эти потери можно только уменьшением разности температур  $\Delta T$  между потоками, чего можно достигнуть, например, включением детандеров.

Однако уменьшение разности температур приводит к увеличению поверхности теплообмена и, следовательно, увеличению капитальных  $Z_k$  затрат. Капитальные затраты увеличиваются в этом случае также из-за включения в криоблок дополнительного оборудования — детандеров. Таким образом, уменьшение энергетических затрат достигается в рассмотренном случае ценой увеличения капитальных затрат. Поэтому должен существовать оптимум, отвечающий минимуму суммарных затрат  $\Sigma Z$ .

Ход технико-экономической оптимизации рассмотрен в значительно упрощенном виде при учете влияния только одного фактора — разности температур  $\Delta T$  в теплообменнике. В действительности это сложный, трудоемкий процесс, требующий учета, как уже было сказано, многих факторов. Применительно к установкам разделения воздуха вопросы технико-экономической оптимизации подробно обсуждаются в [23].

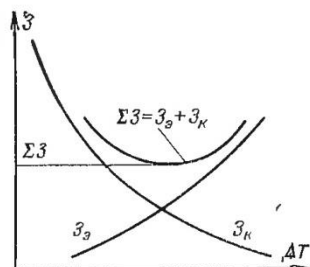


Рис. 20. Зависимость затрат на теплообменники криоблока от минимальной разности температур между потоками.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ

#### 13. ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ

В любой низкотемпературной установке часть оборудования работает при температуре окружающей среды. К такому оборудованию относятся, например, компрессорные агрегаты, некоторые системы очистки, сбора и

хранения газов и т. д. Это оборудование практически не отличается от систем аналогичного назначения, используемых в других областях техники.

Особенности низкотемпературного оборудования вызваны специфичностью условий, в которых оно работает. Проектирование таких систем должно производиться с учетом следующих общих требований.

1. При разработке низкотемпературного оборудования необходимо стремиться к максимально возможному снижению его металлоемкости. Чем ниже металлоемкость низкотемпературных элементов, тем быстрее они охлаждаются при прочих равных условиях и тем значительно сокращаются энергетические затраты на охлаждение в пусковой период.

2. Элементы низкотемпературного оборудования, имеющие зоны высоких и низких температур, должны быть сконструированы так, чтобы теплоприток к их холодной области был минимальным.

3. При разработке низкотемпературного оборудования необходимо учитывать изменение свойств материалов в области низких температур. Некоторые материалы при низких температурах становятся хрупкими и непригодными для изготовления оборудования.

4. В области низких температур не допускается применение масел для смазки трущихся элементов, поэтому используются материалы, не требующие смазки. По возможности следует избегать трущихся элементов в области низких температур, так как для отвода теплоты трения необходимо затрачивать соответствующую работу.

На практике не всегда удается полностью учесть эти требования, что ведет к снижению эффективности низкотемпературных установок.

Некоторые особенности низкотемпературного оборудования рассмотрим на примерах конструкций теплообменников, а также низкотемпературного блока (криоблока) гелиевого ожижителя Г-45.

Как правило, габариты криоблоков определяются размерами входящих в них теплообменных аппаратов. Их назначение в технике низких температур заключается в сохранении холода, т. е. в использовании уходящего из установки холодного потока или холода от постороннего источника для охлаждения поступающего в установку теплого потока.

С целью уменьшения энергозатрат, как это следует из § 12, теплообмен необходимо проводить при небольших разностях температур между потоками. Однако такие разности температур приводят к увеличению габаритов аппаратов. Для того чтобы сохранить приемлемыми размеры теплообменников, необходимо использовать компактные конструкции с развитыми поверхностями теплообмена.

На рис. 21 приведены два типа теплообменников, характерных для низких температур.

В теплообменнике типа «труба в трубе» (рис. 21, а) по внутренней трубе пропускают поток, имеющий более высокое давление и сравнительно высокий коэффициент теплоотдачи. Обычно это охлаждаемый поток. В межтрубном пространстве проходит поток с меньшим давлением и коэффициентом теплоотдачи. Но внешняя поверхность оребренной трубки больше, чем ее внутренняя поверхность. Этим в значительной степени выравниваются условия теплопередачи. Такие же условия создаются и в витом теплообменнике из оребренных труб (рис. 21, б).

Оребрение труб, используемых в низкотемпературных теплообменниках, чаще всего выполняется методом холодного выдавливания ребер при обкатке толстостенных труб специальными роликами или навивкой проволоки.

Большой компактностью и малым сопротивлением обладают пластинчато-ребристые теплообменники, используемые в технике низких температур. Эти теплообменники представляют собой многосекционные аппараты, заполненные металлической насадкой в виде пластин, образующих ребра. Насадка припаивается к перегородкам, образующим каналы.

На рис. 22 показаны элементы отдельной секции и трехсекционный теплообменник.

Секция теплообменника состоит из двух перегородок 1 и 2, между которыми устанавливается насадка 3, а

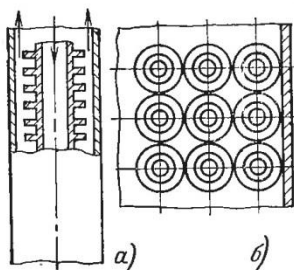


Рис. 21. Элементы теплообменников.

а — тип «труба в трубе» с внутренней оребренной трубкой; б — витой из оребренных труб.

боковые стороны закрываются проставками 4 и 5. После набора необходимого числа секций теплообменник сплавляется. Теплообмен между потоками происходит через насадку и пластины, разделяющие каналы.

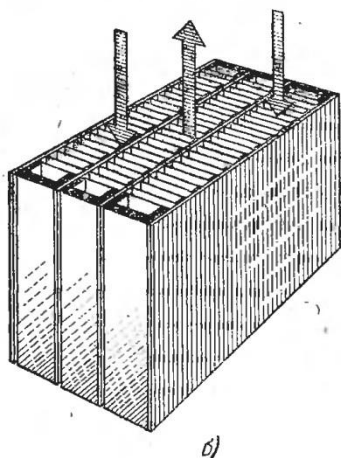
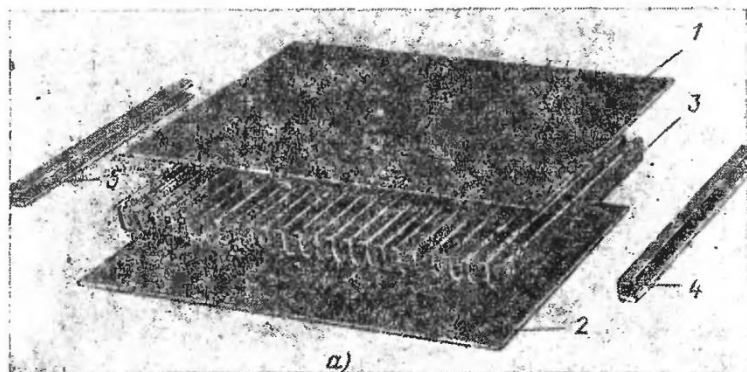


Рис. 22. Пластинчато-ребристый теплообменник.

*а* — отдельная секция теплообменника; 1, 2 — перегородки; 3 — насадка; 4, 5 — боковые проставки; *б* — три секции в сборе.

Изготавливаются теплообменники в основном из алюминия.

В последние годы разработан ряд новых конструкций высокоэффективных теплообменных аппаратов. Наиболее перспективным из них является сетчатый теплообменник. С его конструкцией можно ознакомиться в [1].



К вакуум-нагосу

He в компрессор

He из компрессора

He  
в азотный  
теплообменник

Жидкий  $N_2$

Слив жидкого He

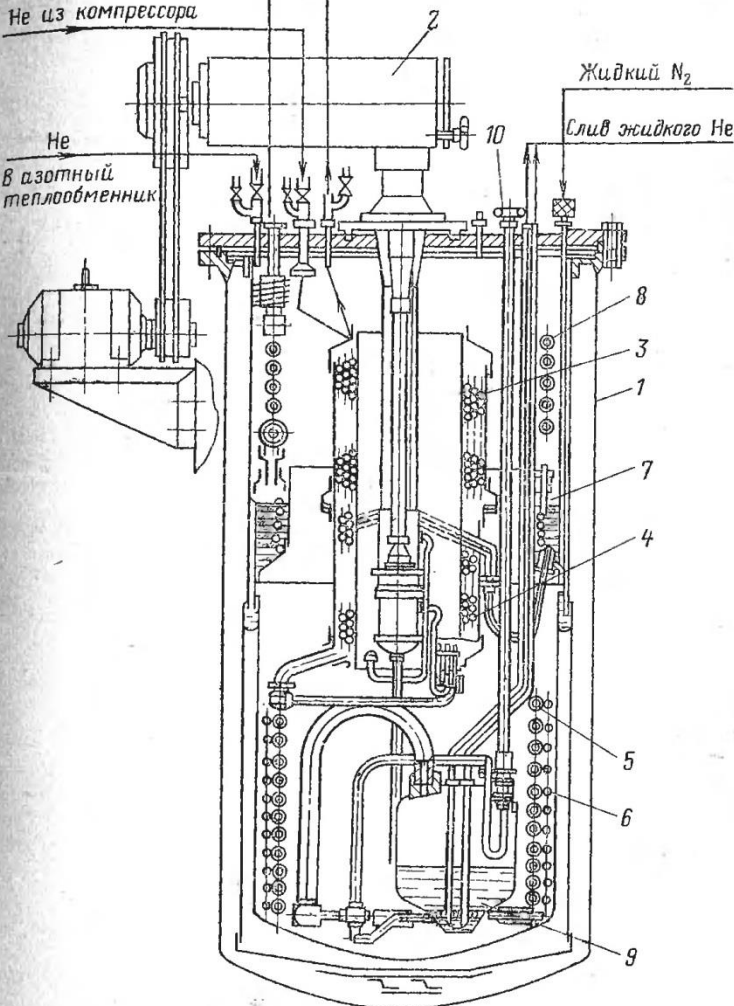


Рис. 23. Конструктивная схема низкотемпературного блока гелиевого ожижителя Г-45.

1 — корпус; 2 — детандерный агрегат; 3—6 — теплообменники; 7 — азотная вентиль; 8 — азотный теплообменник; 9 — сборник жидкого гелия; 10 — дроссельный вентиль.

Принцип компоновки низкотемпературного оборудования показан на рис. 23.

Теплообменные аппараты гелиевого ожижителя, схема которого приведена на рис. 13, размещены в металлическом сосуде Дьюара 1. В этой конструкции использованы три типа теплообменников: 5 и 8 выполнены по типу «труба в трубе» с оребренной внутренней трубкой, 3 и 4 — витые из оребренных трубок. Кроме того, имеется ванна с жидким посторонним криоагентом (азотом), в которой происходит дополнительное охлаждение прямого потока гелия.

Все теплообменники выполнены из медных труб, а их конструкция такова, что позволяет компактно разместить детандер 2, сборник жидкого гелия 9 и дроссельный вентиль 10. Все оборудование крепится в крышке. Управление детандером и дроссельным вентилем выведено в теплую зону. Таким образом низкотемпературные элементы не касаются корпуса сосуда Дьюара. Для защиты аппаратов, имеющих температуру ниже азотной, от лучистого теплопритока в нижней части сосуда Дьюара расположен экран, охлаждаемый жидким азотом.

Рассмотренная компоновка низкотемпературного оборудования характерна для сравнительно небольших установок. Низкотемпературное оборудование крупных установок может размещаться в нескольких сосудах Дьюара, однако принцип размещения в каждом сосуде сохраняется одинаковым.

#### **14. РОЛЬ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМАХ**

В технике низких температур, так же как и в теплотехнике, для уменьшения нежелательного теплообмена между системой и окружающей средой используется тепловая изоляция. В теплотехнике изоляция уменьшает потери теплоты от изолируемого объекта в окружающую среду; в технике низких температур она, наоборот, препятствует притоку теплоты из окружающей среды к объекту, имеющему более низкую температуру.

Различие, заключающееся только в направлении теплового потока, проходящего через изоляцию, не имеет, конечно, существенного значения. В обоих случаях к качеству изоляции предъявляются одинаковые требования — она должна обладать как можно большим сопротивлением тепловому потоку.

Вместе с тем имеется и некоторая особенность в требованиях к низкотемпературной изоляции. Эта особенность связана, прежде всего, со спецификой области низких температур. Если теплотехника имеет дело с весьма большим диапазоном температур, исчисляемым тысячами градусов, то в распоряжении техники низких температур находится, как мы уже знаем, только около 300 К. Это приводит к тому, что тепловой поток, имеющий в одном случае температуру выше, а в другом на столько же градусов ниже, чем  $T_{0.c}$ , располагает неодинаковой эксергией или, другими словами, не одинаково термодинамически ценен.

Действительно, если, например, в теплосиловой установке происходит потеря 1 Вт теплоты на температурном уровне  $T=599,9$  К (при  $T_{0.c}=300$  К), то это будет эквивалентно в идеальном случае уменьшению ее мощности примерно на 0,5 Вт.

При такой же разности температур  $T_{0.c}-T$  в случае низкотемпературной установки, т. е. при  $T=0,1$  К, для компенсации теплопритока через изоляцию в 1 Вт потребуются согласно уравнению (33), затраты мощности, равные 2999 Вт.

При увеличении температурного интервала  $T-T_{0.c}$  это различие в потерях мощности в теплосиловой и низкотемпературной установках будет еще больше.

Для области  $T>T_{0.c}$  потеря 1 Вт теплоты при  $T\rightarrow\infty$  будет эквивалентна потере мощности, стремящейся также к 1 Вт.

В низкотемпературной области при  $T\rightarrow 0$  К величина  $l$ , затрачиваемая для отвода 1 Вт теплопритока, стремится согласно (33) к бесконечности.

Этим примером мы хотели только подчеркнуть особую важность роли изоляции в технике низких температур, не умаляя, разумеется, ее значения в теплотехнике.

Из рассмотренного примера становится также ясным, что к качеству низкотемпературной теплоизоляции должны предъявляться весьма жесткие требования. Вместе с тем понятно, что с повышением качества изоляции возрастает ее стоимость. В ряде случаев дороже обходится и обслуживание устройств с высококачественной теплоизоляцией. Поэтому выбор типа низкотемпературной изоляции в общем случае сопровождается технико-экономической оптимизацией.

Перейдем к рассмотрению типов изоляции, получивших наиболее широкое распространение в технике низких температур.

#### 15. ИЗОЛЯЦИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕРИАЛОВ, ИМЕЮЩИХ НИЗКУЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Тепловой поток, поступающий к единице поверхности изолируемого объекта, определяется из уравнения

$$q = -\frac{\lambda}{\delta} \Delta T, \quad (47)$$

где  $\lambda$  — эффективный коэффициент теплопроводности изоляции;  $\delta$  — толщина изоляции;  $\Delta T$  — разность температур между наружным и внутренним слоями изоляции.

При постоянных значениях  $\delta$  и  $\Delta T$  значение  $q$  зависит только от коэффициента теплопроводности  $\lambda$ .

В качестве изоляционных материалов в технике низких температур используются в основном волокнистые, зернистые и ячеистые материалы. Их коэффициент теплопроводности находится в пределах 0,02—0,05 Вт/(м·К).

Передача теплоты через изоляцию идет как по твердому скелету изоляционного материала, так и через газ, заполняющий пустоты. Чем больше пор, тем больше доля теплового потока проходит через газовую среду. Таким образом, по мере увеличения пористости изоляции ее теплопроводность приближается к теплопроводности газа, заполняющего твердый скелет теплоизоляции.

При крупных порах возникает конвекция газа, приводящая к существенному увеличению теплопроводности. Чтобы этого избежать, используют, как правило, только мелкопористую изоляцию.

Обычно в порах изоляционных материалов, кроме ячеистых, содержится воздух. Если при рабочей температуре возможна конденсация воздуха, то поры заполняют другим, не конденсирующимся при этих температурах газом.

Волокнистые изоляционные материалы, такие как минеральная вата, стеклянная вата или шелковые очесы, широко используются для изоляции крупных установок разделения газовых смесей.

Наиболее дешевый материал — минеральную вату получают путем плавления некоторых горных пород (гранита, кварцита и др.) или шлаков металлургических печей с последующим раздувом расплава струей пара или воздуха. В результате получают волокна диаметром 6—10 мкм и длиной 3—20 мм.

Стеклянную вату производят из расплавленной стеклянной шихты. Диаметр волокон в зависимости от способа изготовления может быть от 30 до 50 мкм. Изоляционные свойства изоляции, выполненной из ультратонкого стекловолокна, чрезвычайно высоки. Коэффициент теплопроводности может достигать 0,023 Вт/(м·К) [9].

Минеральная и стеклянная вата негорючи. Однако они обладают существенным недостатком — при монтажных работах могут поражать кожу и дыхательные пути человека. В тех случаях, когда применяют эти типы изоляции, принимают тщательные меры предосторожности.

Шелковые очесы, получаемые как отходы шелкопрядильной промышленности, не имеют этого недостатка. Однако они существенно дороже, по этой причине их используют значительно реже.

*Зернистые*, или, как их часто называют вследствие малых размеров зерен, *порошкообразные* материалы применяются в основном для изоляции сосудов, содержащих низкотемпературные жидкости. Иногда их используют и для заполнения изоляционных кожухов небольших криостатов или других низкотемпературных установок.

Наибольшее распространение из порошковых материалов получили перлит и аэрогель кремниевой кислоты.

Вспученный перлит представляет собой материал, получаемый путем обжига кремнеземистых горных пород вулканического происхождения. Он содержит примерно 70% двуокиси кремния, 10—15% глинозёма, 4—8% окислов калия и натрия, а также другие примеси. В необожженном перлите находится также несколько процентов воды. При нагревании до 700—1000°C порода размягчается, а вода переходит в пар, вспучивая массу материала.

Аэрогель кремниевой кислоты получают смешиванием раствора жидкого стекла с серной кислотой. Аэрогель — дешевый и качественный изоляционный материал, однако

Таблица 4 Основные характеристики изоляционных материалов [9, 13]

| Наименование материала                     | ГОСТ или ТУ        | Объемная плотность, кг/м³                                     | Коэффициент теплопроводности<br>Вт/(м·К) при температуре, К |            |
|--------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------|
|                                            |                    |                                                               | 190                                                         | 293        |
| Аэрогель кремниевой кислоты                | ТУ 38-10218-74     | 40—60 (при ручной утряске), 130 (при уплотнении под вакуумом) | 0,019÷0,02                                                  | 0,025      |
| Вата минеральная марки 100 (шлаковая вата) | ГОСТ 4640-76       | 100 (под нагрузкой $2 \cdot 10^3$ Па)                         | 0,03                                                        | 0,044      |
| Вата из супертонкого стекловолокна СТБ     | ТУ 21-РСФСР-224-75 | Не более 20                                                   | 0,023                                                       | 0,044      |
| Вспученный перлитовый песок:               |                    |                                                               |                                                             |            |
| пудра 150                                  | } ГОСТ 10832-74    | 150                                                           | 0,035                                                       | 0,058      |
| порошок 75                                 |                    | 75                                                            | 0,03                                                        | 0,047      |
| Пенополиуретан марки ППУ-3с                | ТУ 6-05-221-353-75 | 50—70                                                         | 0,03                                                        | 0,047—0,05 |
| Пенопласт полистирольный плиточный:        |                    |                                                               |                                                             |            |
| ПС-4-40                                    | } ТУ 6-05-1178-75  | 40                                                            | 0,026                                                       | 0,04       |
| ПС-1-150                                   |                    | 150                                                           | —                                                           | 0,05       |

при попадании в него капельной влаги меняется его структура и увеличивается теплопроводность.

Изолируемое криогенное оборудование предварительно заключается в кожух с последующей забивкой или засыпкой изоляционным материалом. Иногда кожух делают двухстенным с размещением между стенками изоляции.

Из *ячеистых материалов* наибольшее применение получили пенополистирол и пенополиуретан. Эти пенопласты имеют замкнутые поры, в которых в результате вспенивания материала остаются легкоконденсируемые газы, такие как изопентан, аммиак, двуокись углерода и др. При низких температурах происходит конденсация газов, заполняющих поры с образованием в них вакуума, что улучшает изоляционные свойства пенопластов.

Пенопласты выпускаются в виде плит, которые в некоторых случаях наряду с изоляционными функциями выполняют роль и конструкционных материалов. Так, например, в лабораторной практике часто используются небольшие пенопластовые сосуды для кратковременного хранения сжиженных газов.

Изоляцию с помощью пенополистирола и пенополиуретана можно проводить непосредственно в процессе их получения. Для этого изолируемые участки аппаратов, трубопроводов и т. д. заключаются в кожух, куда затем помещаются компоненты, необходимые для образования пенопласта. В результате реакции шихта вспенивается и пенопласт плотно приклеивается к изолируемым участкам. Прочность такого склеивания настолько велика, что, несмотря на различные коэффициенты линейного расширения материалов, не происходит отставания пенопласта от металла при многократном охлаждении изделий до температур около 80 К с последующим отогревом до  $T_{0.c}$ .

Основные характеристики некоторых изоляционных материалов, работающих под атмосферным давлением, приведены в табл. 4.

#### **16. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВАКУУМА для создания высокоэффективной изоляции**

На пути теплового потока можно поставить существенную преграду, удалив газ, заполняющий волокнистую или порошковую изоляцию.

Действительно, через газовую среду в изоляции пере-

дача теплоты осуществляется конвекцией, теплопроводностью и излучением. Если удалить газ, то первые, наиболее интенсивные составляющие теплопереноса будут практически исключены. Останется только теплопередача излучением. Таким образом, можно существенно повысить термическое сопротивление изоляции.

Конечно, полностью откачать газ из изоляционного пространства, т. е. создать абсолютный вакуум, невозможно, да это, как мы увидим ниже, и не требуется. В ряде случаев оказывается вполне достаточным понизить давление в изоляционном пространстве до 5—1 Па, чтобы существенно улучшить изоляционные качества волокнистых и порошковых материалов. При таких значениях остаточного давления конвекция практически полностью исключается; существенно уменьшается и теплопроводность оставшегося газа, при пониженном давлении газовой среды увеличивается также сопротивление тепловому потоку и в местах контакта соответственно волокон или зерен изоляционного материала. Это приводит к уменьшению количества теплоты, проходящего непосредственно по скелету изоляции.

Увеличение контактного сопротивления проявляется так, как будто уменьшается теплопроводность вещества скелета изоляционного материала. В действительности же теплопроводность этого вещества остается практически неизменной, а снижается тепловой поток при прочих равных условиях только вследствие возросшего контактного сопротивления.

Таким образом, при вакуумировании изоляционного пространства теплопроводность изоляции понижается вследствие уменьшения переноса теплоты через газовые зазоры, находящиеся как между волокнами или зернами, так и в зоне их контакта.

Для снижения теплопритока излучением в порошковую вакуумную изоляцию добавляют обычно бронзовую или алюминиевую пудру в количестве до 50% по объему.

В вакуумной среде улучшаются также изоляционные свойства и ячеистых материалов. Их теплопроводность снижается вследствие уменьшения передачи теплоты через газовую среду, находящуюся в порах. Однако откачать газ из замкнутых пор ячеистой изоляции — задача весьма трудная. Поэтому в сочетании с вакуумной ячеистая изоляция используется редко.



В табл. 5 показана кажущаяся теплопроводность некоторых изоляционных материалов, находящихся в разреженной среде. Как видно из этой таблицы, наименьшую теплопроводность в вакууме имеет порошковая изоляция. Это объясняется тем, что при сравнительно малом коэффициенте теплопроводности начинает сильнее сказываться составляющая переноса теплоты вдоль волокон, и поэтому теплопроводность волокнистых материалов оказывается выше порошковых.

**Таблица 5 Коэффициент теплопроводности вакуумированных порошковых и волокнистых материалов при граничных температурах поверхностей 293 и 90 К [13]**

| Материал                    | Средний размер частиц, мм | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , МВт/(м·К), при давлении, МПа |                        |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|
|                             |                           |                              | 0,133·10 <sup>-6</sup>                                                | 0,133·10 <sup>-3</sup> |
| Аэрогель кремниевой кислоты | <0,25                     | 110—140                      | 1,4—1,5                                                               | 2,1—2,7                |
| Кремнегель                  | <0,05                     | 100                          | 1,5                                                                   | 2,7                    |
| Перлит вспученный           | <0,25                     | 100                          | 1,1                                                                   | 3,2                    |
| Стекланная вата             | 0,018                     | 160                          | 5,0                                                                   | 16,0                   |
| Минеральная вата            | 0,01                      | 150                          | 3,0                                                                   | 10,5                   |

Исторически получилось так, что вакуум начал использоваться не в связи с попытками улучшения изоляционных свойств слоистых или порошковых материалов, а как самостоятельный вид изоляции.

Впервые изоляционные свойства вакуума были использованы в 1874 г. английским физиком Дж. Дьюаром при создании тепловой изоляции калориметра.

Для хранения низкотемпературных жидкостей французский ученый Д'Арсонваль разработал в 1887 г. двухстенный стеклянный сосуд с вакуумным пространством между стенками. Интересно отметить, что Д'Арсонваль независимо от Дьюара использовал изоляционные свойства вакуума теперь уже для создания высокоэффективной низкотемпературной изоляции. Сам Дьюар, проводивший эксперименты с низкотемпературными жидкостями и несомненно испытывавший трудности при их хранении, применил высоковакуумную изоляцию только в 1892 г., т. е. на 5 лет позже Д'Арсонваля. В связи с этим приоритет создания вакуумной изоляции оспаривается до сих пор: англичане приписывают его

Дьюару, а французы — Д'Арсонвалю. В споре о приоритете все-таки побеждает английская точка зрения. Для этого имеются веские причины. Занявшись низкотемпературной вакуумной изоляцией, Дьюар внес два существенных усовершенствования, повысивших ее качество. Первое из них было связано с уменьшением теплопритока излучением от теплой стенки сосуда к холодной.

В высоковакуумном пространстве между двойными стенками сосуда конвекция практически исключается, а теплопроводность остаточного газа сводится к минимуму. Поэтому основной составляющей теплопереноса является лучистый теплообмен. Связанный с ним тепловой поток определяется из уравнения

$$Q_{\text{л}} = \sigma EF(T_2^4 - T_1^4), \quad (48)$$

где  $\sigma$  — константа излучения;  $E$  — приведенный коэффициент теплового излучения;  $F$  — площадь поверхности;  $T_1$ ,  $T_2$  — соответственно температуры холодной и теплой стенок.

Из (48) следует, что  $Q_{\text{л}}$  прямо пропорциональна  $E$ . Приведенный коэффициент теплового излучения в общем случае зависит от коэффициента излучения материала стенок, формы сосуда, типа лучистого отражения. Определяющей величиной в этой зависимости является коэффициент теплового излучения  $\epsilon$  материала стенок.

В табл. 6 приведены значения коэффициента теплового излучения для некоторых материалов.

Как видно из таблицы, коэффициент теплового излучения  $\epsilon$  существенно зависит от материала. Это обстоятельство и было учтено в первую очередь Дьюаром. Он предложил посеребрить поверхности стенок, обращенные в вакуумное пространство. Таким образом ему удалось уменьшить коэффициент теплового излучения стенок примерно в 25 раз и соответственно понизить теплоприток излучением примерно в 5 раз.

Второе усовершенствование вакуумной изоляции касалось размещения адсорбента в вакуумной полости. Дьюар предложил поместить в вакуумную полость активированный уголь. Адсорбционная способность угля значительно возрастает по мере понижения температуры. Адсорбент при заливке криогенной жидкости в сосуд охлаждается и дополнительно поглощает часть оставшегося в вакуумной полости газа. Благодаря этому вакуум в изоляционном пространстве увеличивается и

тем самым снижается теплопроводность остаточных газов. Давление остаточных газов обычно не превышает  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  Па.

Эти два усовершенствования Дьюара были настолько удачными, что сосуда его конструкции практически без изменений широко применяются до сих пор. Теперь

Таблица 6 Коэффициент теплового излучения для некоторых конструкционных материалов [13]

| Материал                                                                   | Температура, К                     |                       | •     |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------|
|                                                                            | излучающего абсолютно черного тела | поверхности материала |       |
| Алюминий отожженный электро-полированный                                   | 300                                | 300                   | 0,03  |
| То же                                                                      | 300                                | 76                    | 0,018 |
| „ „                                                                        | 300                                | 4                     | 0,011 |
| Золотая фольга толщиной, мкм:                                              |                                    |                       |       |
| 40                                                                         | 295                                | 76                    | 0,01  |
| 1                                                                          | 295                                | 76                    | 0,023 |
| Латунь полированная                                                        | 373                                | 373                   | 0,03  |
| Латунь листовая прокатная                                                  | 300                                | 300                   | 0,06  |
| Серебро (матовая поверхность, полученная осаждением из раствора на стекло) | 293                                | 90                    | 0,036 |
| Стекло                                                                     | 293                                | 293                   | 0,94  |

становится общепринятым сосуда с высоковакуумной изоляцией независимо от материала стенок называть сосудах Дьюара или просто дьюарами. В промышленных условиях, как правило, используются металлические сосуда Дьюара.

С развитием криогенной техники, широким использованием жидких водорода и гелия изоляционные свойства только высокого вакуума перестали удовлетворять возросшим требованиям, предъявляемым к качеству изоляции.

Из-за малых теплот парообразования водорода и особенно гелия и низких температур этих жидкостей теплоприток излучением приводит все же к значительным их потерям в результате испарения. В связи с этим появилась идея размещать экраны в высоковакуумном изоляционном пространстве металлических сосудов Дьюара.

Обычно экраны изготавливают из теплопроводных материалов, имеющих малый коэффициент теплового

излучения. Экраны делают как охлаждаемыми, так и неохлаждаемыми. В обоих случаях они не имеют теплового контакта со стенками сосуда.

Охлаждение экрана осуществляют посторонним криоагентом или паром хранимой жидкости. В криогенных рефрижераторах и ожижителях для охлаждения экранов иногда используют часть потока рабочего вещества при соответствующей температуре.

Экранирование холодных стенок позволило резко уменьшить теплоприток излучением. Так, установка одного охлаждаемого жидким азотом экрана в сосудах для хранения жидких водорода и гелия уменьшает теплоприток излучением в 150—200 раз [13]. В случае установки одного неохлаждаемого (пассивного) экрана с тем же коэффициентом теплового излучения, что и стенки сосуда, теплоприток излучением уменьшается вдвое, при установке  $n$  экранов — соответственно в  $n+1$  раз.

Использование неохлаждаемых экранов имеет свои преимущества, так как отпадает необходимость в устройстве системы их охлаждения. Однако для эффективного экранирования требуется установка многих экранов.

Развитие конструкции пассивного экранирования привело к созданию многослойной экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ). Эта изоляция представляет собой чередующиеся слои тонких металлических экранов с прокладочным материалом низкой теплопроводности и в настоящее время является наиболее эффективной и широко используется в технике низких температур. В качестве экранов обычно используется алюминиевая фольга толщиной 6—30 мкм, а прокладочным материалом служит стеклоткань, стеклоткань и т. д. Иногда используют алюминированные с одной или обеих сторон лавсановые или другие пленки. Если пленка алюминирована с обеих сторон, то прокладочный низкотеплопроводный материал используется обязательно. В случае применения пленки, алюминированной с одной стороны, использование прокладочного материала не обязательно. Многослойная экранно-вакуумная изоляция, размещенная в вакуумной полости сосуда, обладает чрезвычайно низким коэффициентом теплопроводности.

В табл. 7 приведены значения коэффициентов теплопроводности некоторых типов ЭВТИ.

При использовании ЭВТИ значительно затрудняется процесс вакуумирования изоляционного пространства. Слои изоляции имеют малую пропускную способность для удаляемых газов. Основное препятствие при откачке представляют непроницаемые для газов металлические экраны. Вследствие этого в средних слоях ЭВТИ устанавливается значительно более высокое давление, чем в наружных. В результате повышается теплопровод-

Таблица 7 Коэффициент теплопроводности многослойных изоляций. Температура теплой стенки 290—300 К; вакуум в изоляционном пространстве до 0,0133 Па [13]

| Материал                                                                             |                  | Толщина прокладок, мм | Плотность изоляции, кг/м <sup>3</sup> | Количество экранов в 1 см | Температура холодной стенки, К | Коэффициент теплопроводности, МВт/(м·К) |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| экрана                                                                               | прокладки        |                       |                                       |                           |                                |                                         |
| Алюминиевая фольга толщиной 10 мкм<br>Алюминированная полиэтилентерефталатная пленка | Стеклохолст ЭВТИ | 0,1                   | 70                                    | 15                        | 90                             | 0,045                                   |
|                                                                                      | Стеклобумага СБР | 0,05                  | 75                                    | 20                        | 90                             | 0,025                                   |
|                                                                                      | Без прокладок    | —                     | 38                                    | 25                        | 90                             | 0,032                                   |
|                                                                                      | Стеклосетка ССА  | 0,05                  | 330                                   | 60                        | 90                             | 0,025                                   |

ность остаточных газов и тем самым увеличивается эффективный коэффициент теплопроводности изоляции. Уменьшения остаточного давления газов можно достигнуть только длительной откачкой; обычно такая откачка продолжается несколько суток.

В последнее время сотрудниками Физико-технического института низких температур АН СССР разработана ЭВТИ, значительно облегчающая процесс откачки и достижения более высокого вакуума. Этого удалось достигнуть благодаря разработке ЭВТИ с чрезвычайно мелкими отверстиями в экранах, проницаемыми для газа и практически непроницаемыми для излучения. Такая перфорация экранов дает возможность существенно понизить давление остаточного газа в изоляции и тем самым уменьшить ее эффективный коэффициент теплопроводности.

Таким образом, к настоящему времени разработаны и используются весьма эффективные типы низкотемпературной теплоизоляции. Выбор того или иного типа изоляции зависит в каждом конкретном случае от ряда факторов: температурного уровня работы изолируемого

оборудования, назначения и условия работы оборудования (транспортные, транспортируемые или стационарные изделия), габаритов и форм изолируемых объектов, стоимости изоляции.

Вакуумно-многослойная изоляция является наиболее эффективной из всех известных типов. Ее целесообразно применять всегда, когда требуется уменьшить теплоприток до минимально возможных значений.

Вместе с тем должны учитываться и экономические аспекты использования изоляции. Так, например, при замене вакуумно-порошковой изоляции на вакуумно-многослойную испаряемость жидкого кислорода в сосуде вместимостью 100 м<sup>3</sup> можно уменьшить в 10 раз. Но стоимость изоляции при этом возрастает настолько, что потребуются значительное время, чтобы окупить дополнительные затраты [9]. Очевидно, по мере дальнейшего совершенствования вакуумно-многослойной изоляции, отработки технологии как ее производства, так и нанесения изоляционного слоя на сосуд сроки окупаемости могут несколько уменьшиться, но будут все же большими.

В общем виде можно установить только примерные области целесообразного использования того или иного типа изоляции [9].

1. Насыпную изоляцию, работающую под атмосферным давлением, целесообразно использовать в крупных системах с температурой не ниже 80 К.

2. Вакуумно-порошковая изоляция может использоваться в крупных системах вплоть до гелиевых (4,2 К) температур. Кроме того, ее выгодно использовать и в небольших системах с минимальной температурой до 80 К. К ним в первую очередь можно отнести сосуды для хранения и перевозки жидких азота и кислорода, а также небольшие воздухоразделительные и ожижительные установки.

3. Экранно-вакуумная (ЭВТИ) изоляция в основном применяется в установках для получения, хранения и использования криоагентов, имеющих температуру ниже 20 К. В отдельных случаях ее целесообразно использовать в небольших системах, имеющих и более высокое значение минимального температурного уровня.

В каждом конкретном случае при выборе того или иного типа изоляции приходится учитывать целый комплекс инженерно-экономических факторов.

**ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР****17. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Низкие температуры издавна находят применение в сфере деятельности человека. Первые заботы о сохранении впрок продуктов питания заставили людей использовать естественные источники холода, температуры которых ниже температуры окружающей среды — лед и воду подземных источников. Позднее более глубокого понижения температур стали добиваться, используя смеси льда и поваренной соли.

Увеличение масштабов использования холода для хранения и транспорта продуктов питания стимулировало создание искусственных способов охлаждения до температур, лежащих значительно ниже температуры окружающей среды. В таких установках возможно достижение температур вплоть до гелиевых независимо от времени года и климатических условий.

Эти установки, появление которых относится к началу XIX в., стали называться холодильными машинами, что не всегда справедливо, ибо в ряде случаев они не содержали движущихся элементов — непременно составной части любой машины.

Ниже рассмотрены направления, по которым сосредоточено использование низких температур для установления основных областей применения холодильных и криогенных установок.

**18. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ**

Большинство применяемых в народном хозяйстве газов не содержится в природе в чистом виде, и для их получения необходимо применять разделение газовых смесей на составляющие.

Среди многочисленных способов разделения, основанных на различных физических свойствах разных газов, низкотемпературное разделение характеризуется минимальными затратами работы и наиболее качественным результатом разделения.

Из установок низкотемпературного разделения наиболее распространены воздухоразделительные установки, основные продукты которых — кислород и азот ши-

роко используются в народном хозяйстве. Кроме этих газов из воздуха выделяют также аргон, криптон, ксенон и неон-гелиевую смесь.

Современная воздухоразделительная установка — сложный комплекс, состоящий из нескольких низкотемпературных аппаратов и машин.

Состав оборудования таких комплексов зависит от назначения установки: в одних — это получение только

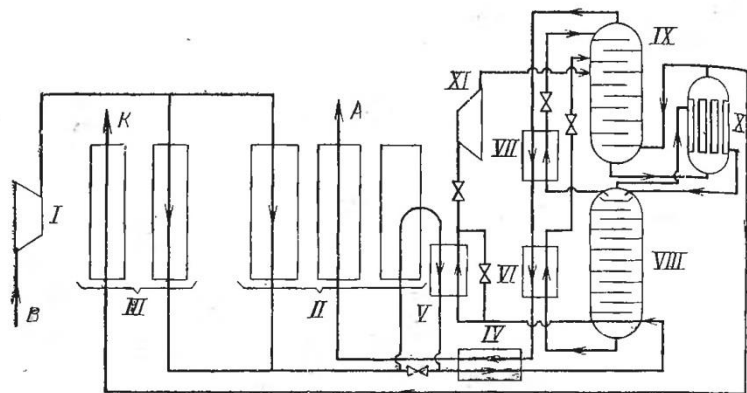


Рис. 24. Принципиальная схема воздухоразделительной установки низкого давления.

кислорода (жидкого или газообразного), азот в этом случае — отбросной продукт, в других — азот также относится к продуктам установки.

Воздухоразделительные установки различаются по количеству перерабатываемого воздуха и схеме осуществления в них низкотемпературного процесса.

Установки высокого давления, производящие жидкий кислород, перерабатывают от сотен до нескольких тысяч кубических метров воздуха в час. Количество перерабатываемого воздуха в крупных установках низкого давления, вырабатывающих в основном газообразные продукты, составляет десятки и сотни тысяч кубических метров воздуха в час.

С ростом производительности установки снижаются потери, отнесенные к 1 м<sup>3</sup> перерабатываемого воздуха.

В качестве примера рассмотрим принципиальную схему воздухоразделительной установки большой производительности, работающей по схеме низкого давления (рис. 24).



Воздух *B* после компрессора *I* поступает параллельно в азотные *II* и кислородные *III* регенераторы и после подогревателя азота *IV* направляется в нижнюю часть колонны. Как видно из схемы, колонна двойной ректификации состоит из отдельных элементов: верхняя колонна *IX*, нижняя колонна *VIII* и конденсатор-испаритель *X* выполнены как отдельные аппараты. Это объясняется их большими размерами в установках большой производительности.

Часть воздуха низкого давления отбирается из общего потока, поступившего в нижнюю колонну, охлаждается в теплообменнике *V* и турбодетандере *XI* и подается в верхнюю колонну на разделение.

Охладители *VI* и *VII* служат для понижения температуры жидкого азота и жидкости испарителя ниже их температуры кипения более холодным газообразным азотом, выходящим из верхней колонны. Благодаря этому при дросселировании образуется меньше пара и больше жидкости, что улучшает ректификацию в верхней колонне. Одновременно газообразный азот подогревается выше температуры насыщения. Дополнительный подогрев азота производится в нагревателе *IV*, что способствует лучшему выносу примесей из регенераторов обратным потоком. Продукты установки, газообразные азот (*A*) и кислород (*K*), отводятся из установки через регенераторы *II* и *III*, нагреваясь за счет охлаждения потока воздуха.

Одна из крупных отечественных установок КтК-35 (БР-2 м) при количестве воздуха на входе в блок разделения 180 000 м<sup>3</sup>/ч и производительности 24 000 м<sup>3</sup>/ч технологического и 11 000 м<sup>3</sup>/ч технического кислорода имеет удельный расход энергии 0,42 кВт·ч на 1 м<sup>3</sup> кислорода, к. п. д. установки около 10% [4].

Спроектирована и находится в изготовлении отечественная воздухоразделительная установка Кт-70, которая по данным НПО «Криогенмаш» будет производить около 70 000 м<sup>3</sup>/ч технологического и 3800 м<sup>3</sup>/ч технического кислорода при удельном расходе энергии 0,37 кВт·ч/м<sup>3</sup> кислорода и к. п. д. 13%.

Применение основного продукта разделения воздуха — кислорода является одним из важных направлений, определяющих развитие технического прогресса в черной и цветной металлургии, химической и других отраслях народного хозяйства. Производство кислорода в

СССР составляет десятки миллиардов кубометров в год с ежегодным приростом примерно 20% [4]. Доли использования кислорода основными потребителями промышленности и хозяйства США, %, таковы:

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| Черная и цветная металлургия . . . . . | 60  |
| Химическая промышленность . . . . .    | 25  |
| Ракетная техника . . . . .             | 10  |
| Нефтепереработка . . . . .             | 3   |
| Прочие отрасли . . . . .               | 2   |
| Итого . . . . .                        | 100 |

Основным потребителем кислорода является черная металлургия.

В доменном производстве обогащение дутья кислородом приводит к повышению теплового напряжения в горне печи и одновременному снижению температуры колосника. Вследствие этого повышается степень полезного использования теплоты газов в печи, улучшается тепловой баланс плавки. В доменном производстве СССР используется около 54% производимого кислорода, в сталеплавильном производстве — 35% (из них 20% — в мартеновском, 15% — в конвертерном).

Применение кислорода в конвертерном производстве позволяет значительно повысить производительность процесса и увеличить качество металла. В конвертере кислород проникает в глубину расплавленного металла, что значительно ускоряет плавку. Так, за год в конвертере емкостью 100 т можно выплавить около 750 тыс. т, в то время как мартеновская печь емкостью 500 т металла имеет производительность около 400 тыс. т.

В мартеновском производстве использование кислорода позволяет также сократить сроки выплавки металла. В настоящее время значительная доля общего объема мартеновской стали выплавляется скоростным способом с применением кислорода, а в ближайшие годы всю мартеновскую сталь будут получать с использованием кислорода.

В электросталеплавильном производстве кислород используется особенно эффективно при выплавке нержавеющей и высоколегированных сталей, что позволяет достичь более высоких температур и ускоряет процесс окисления углерода. При выплавке цветных металлов, меди, никеля, цинка, свинца и др. в процессе шахтной

взвешенной и конвертерной плавок применение кислорода позволяет интенсифицировать тепловые, пирометаллургические и гидрометаллургические восстановительные процессы. Это позволяет также значительно увеличить выпуск цветных металлов на действующих заводах, снизить расход топлива.

Кислород находит также широкое применение при сварке и резке металлов, зачистке слитков, в прокатном производстве при огневой зачистке и резке проката.

*В химической промышленности* кислород и азот используют в качестве исходных веществ для производства таких важнейших продуктов, как аммиак, азотная кислота, метиловый спирт, ацетилен, серная кислота и др. Например, для производства 1 т аммиака необходимо 500 м<sup>3</sup> кислорода и 900 м<sup>3</sup> азота.

Потребность в технологическом кислороде крупного современного химического комбината составляет 60—100 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

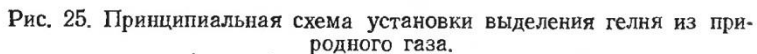
По потреблению кислорода химическая промышленность занимает второе место после металлургии. Использование кислорода в химии позволяет интенсифицировать технологические процессы, создавать компактные и высокопроизводительные агрегаты.

*В энергетике* работы по созданию перспективного магнитогидродинамического способа генерации электроэнергии (МГД) требуют обеспечения высоких (около 2500°С) температур в камере сгорания. Применение воздуха, обогащенного кислородом, с содержанием 30—50% O<sub>2</sub> позволяет создать высокотемпературный подогреватель воздуха вследствие уменьшения температуры предварительного подогрева [4].

Установка МГД должна быть оснащена крупной кислородной станцией производительностью несколько сотен тысяч кубических метров обогащенного воздуха в час.

*В ракетной технике* расходуются большие количества кислорода в двигателях. Например, в 1967 г. потребление кислорода для ракетной техники в США достигло 1654 млн. м<sup>3</sup>, что составило 16,3% общего производства кислорода в США.

Помимо перечисленных основных потребителей, кислород применяют в микробиологии при производстве белково-витаминных кормов, в медицине, авиации, целлюлозно-бумажной промышленности и др. Жидкий азот



Выделение гелия и водорода из газовых смесей облегчается тем, что их критические температуры и нормальные температуры кипения значительно ниже, чем у остальных компонентов смеси.

Гелий выделяют из природного газа, в котором он содержится в небольших количествах. В отечественных месторождениях содержание гелия не превышает 1%. Более богаты гелием газы США и Канады имеют 2—4% (в отдельных случаях до 12%) гелия.

86

Газ из магистрали при давлении в  $16 \text{ кгс/см}^2$  поступает в блок предварительной очистки от  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (БПО). Очистка от  $\text{CO}_2$  осуществляется в скрубберах промывкой газа раствором моноэтаноламина, удаление паров воды производится абсорбционной сушкой в баллонах с силикагелем.

Далее газ сжимается компрессором до  $30 \text{ кгс/см}^2$  и подается в блок основной очистки (БОО), где из него удаляются азот и углеводороды. Вначале отделяются тяжелые ( $\text{C}_2\text{—C}_5$ ), а затем легкие ( $\text{C}_1\text{—C}_2$ ) углеводороды. В блок основной очистки для конденсации углеводородов подается извне жидкий азот. Углеводороды либо отводятся как продукты, либо после подогрева в теплообменнике возвращаются в газовую магистраль. Выходящий из БОО газ содержит 90—95% гелия и небольшое количество азота и водорода. Их удаление производится в блоках каталитической (БКО) и тонкой очистки (БТО).

Тонкая очистка в БТО проводится в две стадии. На первой стадии гелий очищается на катализаторе от водорода, который связывается кислородом из воздуха. После этого газ сжимается компрессором до  $190\text{—}200 \text{ кгс/см}^2$ , осушается от паров  $\text{H}_2\text{O}$  в блоке очистки (БО), подается на очистку от азота конденсацией в ванне жидкого азота, а затем адсорберах.

Потребителю гелий отпускается либо в виде сжатого газа в баллонах, либо в виде жидкости в сосудах Дьюара, танках и цистернах. В последнем случае необходимо включение в схему гелиевого ожижителя (ГО).

Стоимость  $1 \text{ м}^3$  гелия, полученного таким способом, составляет 8—10 руб.

Гелий по праву называют криогенным газом; большинство достижений криогеники связано с применением гелия, особенно в жидком состоянии. Это, прежде всего, исследование и создание различных сверхпроводящих устройств и систем, охлаждение и криостатирование на уровне гелиевых температур электронных и электрических приборов и устройств. Применяется гелий и в низкотемпературных физических исследованиях.

Жидкий гелий используют для создания глубокого вакуума при имитации на земле космических условий.

Водород получают из газов — продуктов переработки нефти, природного и коксового газа, а также электролизом воды. Содержание водорода в исходной для раз-

деления смеси существенно выше, чем гелия, и достигает 30—60%.

Технология извлечения водорода также основана на предварительной очистке и последующей конденсации посторонних компонентов. Вследствие повышенного содержания водорода в исходной смеси процесс значи-

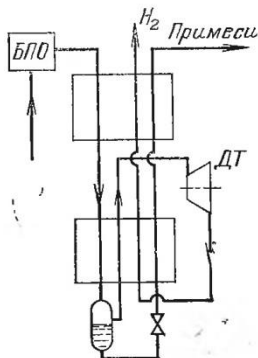


Рис. 26. Принципиальная схема установки извлечения водорода из смеси газов.

тельно упрощается, так как можно меньше считаться с полнотой извлечения продукта.

На рис. 26 показана одна из возможных схем выделения водорода из смеси.

Исходный газ, содержащий водород, проходит блок предварительной очистки (БПО) и направляется в первый теплообменник, где охлаждается обратными потоками водорода и отделенной фракции. Эффект охлаждения смеси достигается за счет ее дросселирования.

Отделение водорода производится в сепараторе; для более полного разделения наряду с се-

парацией используется отмывка углеводородов и азота в колоннах (на схеме не показаны). В качестве дополнительного охлаждения в схеме применено расширение водорода в турбодетандере (ДТ).

Область применения водорода также обширна. Вследствие низкой температуры кипения (20,4 К) водород используют в качестве криоагента в водородных и гелиевых ожижителях и рефрижераторах.

Аналогично гелию водород применяется для создания вакуума в различных термобарокамерах, в том числе и для космических исследований.

Жидкий водород — необходимый элемент многих физических исследований в области твердого тела, в пузырьковых камерах он используется для регистрации следов заряженных частиц.

Водород используется в качестве сырья для получения дейтерия  $D_2$  методом низкотемпературной ректификации жидкого водорода. Дейтерий применяют для замедления нейтронов в ядерных реакторах, а в перспективе он потребуется для термоядерного синтеза.

В химии водород применяется как исходный продукт при синтезе аммиака, гидрогенизации. Водород используется в ракетных двигателях в качестве топлива. Преимущества водорода в этом случае объясняются максимальной из всех возможных видов горючего удельной тягой (435 кгс/кг), а следовательно, меньшими при прочих равных условиях запасами топлива в ракете.

В США созданы кислородно-водородные двигатели для космического корабля «Кентавр», двигатель для последней ступени ракеты «Сатурн» с тягой 91 000 кгс.

Перспективным представляется создание ядерного ракетного двигателя для длительных космических полетов, использующего водород в качестве рабочего тела.

Хранение водорода в резервуарах, особенно в условиях космических полетов, целесообразно в виде смеси, состоящей из 50% жидкости и 50% твердой фазы (в так называемом шугообразном состоянии). При нагреве такой смеси от теплопритоков при наличии твердой фазы происходит лишь ее плавление и очень незначительное повышение давления паров над жидкостью. Такой способ хранения имеет преимущества и с точки зрения взрывобезопасности при транспортировке.

Интересным и перспективным представляется также использование водорода как топлива в авиационных двигателях и в наземном транспорте, так как продукты сгорания двигателя не загрязняют атмосферу.

## **19. ХРАНЕНИЕ И ТРАНСПОРТ ГАЗОВ В СЖИЖЕННОМ СОСТОЯНИИ**

Большинство газов, широко применяемых в различных отраслях народного хозяйства (азот, кислород, водород, гелий, неон, метан и др.), целесообразно хранить и транспортировать в сжиженном состоянии при криогенных температурах.

Эта целесообразность вытекает из термодинамических свойств веществ: в сжиженном состоянии их плотности в 600—1000 раз больше, чем при нормальных условиях. В связи с этим уменьшаются и удешевляются хранилища больших количеств газа, снижаются абсолютная и относительная массы тары при хранении и транспортировке. Так, при перевозке сжатого газообразного кислорода на 6 м<sup>3</sup> газа приходится около 80 кг массы баллона, что примерно в 10 раз превышает массу

самого газа. При транспортировке таких легких газов, как гелий и водород, это соотношение составляет  $80 \text{ м}^3$  и  $160 \text{ кг}$ .

При транспортировке сжиженного кислорода отношение массы тары к массе газа составляет примерно 0,5, т. е. в 20 раз меньше; показатели для гелия и водорода

еще более выгодны. Огромные масштабы потребления метана в народном хозяйстве приводят также к использованию транспорта его в сжиженном состоянии.

Проблема хранения газа возникает из-за неравномерного его потребления предприятиями при пиковых нагрузках. В таких случаях хранилище жидкого метана — единственный целесообразный способ создания резерва. Соотношение плотностей сжиженного и газообразного метана составляет примерно 600.

На мировом рынке широко распространена транспортировка жидкого метана водным транспортом. Танкеры, предназначенные для перевозки метана, вмещают

Рис. 27. Металлический сосуд Дьюара для жидких азота и кислорода АСД-100.

1 — ручка; 2 — внутренний сосуд; 3 — изоляция; 4 — наружный сосуд; 5 — адсорбент; 6 — штуцер для откачки.

$(50—70) \cdot 10^3 \text{ м}^3$  жидкого метана. Известны примеры использования во Франции танкера для жидкого метана вместимостью  $120\,000 \text{ м}^3$ .

Основные продукты рассмотренных в § 18 воздухоразделительных установок — кислород и азот также можно транспортировать в сжиженном состоянии. Для хранения и транспортировки этих жидкостей в таре единичной вместимостью от 5 до 200 л используют металлические сосуды Дьюара, изготавливаемые из меди с полированными поверхностями или алюминиевых сплавов.

Сосуд состоит из концентрично расположенных внутреннего и наружного шаров или цилиндров с порошково-вакуумной изоляцией. Фиксация оболочек осуществляется фетровыми проставками. Для поддержания ваку-



ума во внутренней полости помещен адсорбент. Горловина внутреннего сосуда представляет собой тонкостенную трубку, выполненную из металла с малой теплопроводностью. Конструкция сосуда типа АСД-100 для хранения и транспорта охлажденных газов  $O_2$  и  $N_2$  показана на рис. 27.

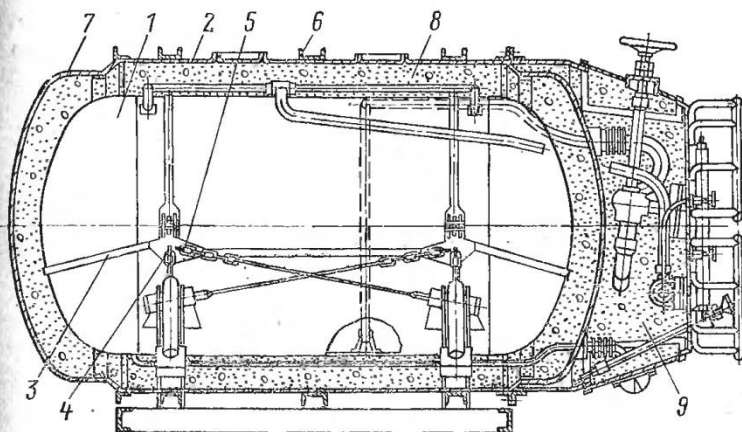


Рис. 28. Конструкция резервуара для охлажденного газа.

1 — сосуд; 2 — кожух; 3 — подвеска; 4 — вертикальные цепи; 5 — продольные цепи; 6 — сварная ферма; 7 — днище; 8 — аэрогель или кремнегель; 9 — мипора.

Для специальных электротехнических и электромагнитных экспериментов, где применение металлических сосудов невозможно, создаются сосуды из пластика.

Для хранения и транспорта больших количеств жидких азота и кислорода применяют также цистерны емкостью 1200—7380 л и стационарные резервуары типа РЦГ емкостью до 200 000 л.

На рис. 28 показана конструктивная схема резервуара для охлажденного газа вместимостью 1200 л. Тонкостенный внутренний сосуд из нержавеющей стали подвешен на цепях внутри кожуха. Пространство между ними заполнено изоляцией. Наполнение и опорожнение сосуда производят через специальный вентиль. Необходимое для переливания жидкости давление создается испарением небольшой части жидкости в испарительном змеевике, расположенном при температуре окружающей

среды. Пар, образующийся в змеевике, поступает в верхнюю часть сосуда и вытесняет жидкость.

Хранение водорода и гелия усложняется применением более качественной изоляции, так как при тех же

теплопритоках из окружающей среды их испаряемость выше вследствие небольших теплот испарения и низких температур кипения.

В сосудах с высоковакуумной изоляцией применяют дополнительный экран, охлаждаемый жидким азотом; в сосудах с порошковой или экранно-вакуумной изоляцией — экраны, охлаждаемые потоком испаряющейся жидкости.

На рис. 29 показана конструктивная схема сосуда для хранения и перевозки жидких гелия и водорода. Остаточное давление в вакуумной полости составляет 1,33 Па. После заливки жидкости в сосуд и снижения температуры стенок оставшиеся газы конденсируются и вакуум улучшается до  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Па. Испаряемость

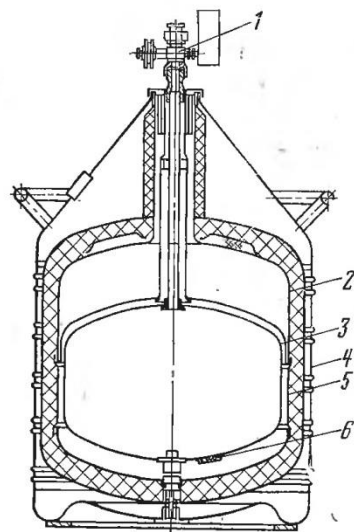


Рис. 29. Конструктивная схема сосуда для хранения и перевозки жидкого гелия СТГ-40.

1 — арматурная головка; 2 — сборник азота; 3 — внутренний сосуд; 4 — кожух; 5 — азотный экран; 6 — адсорбент.

гелия из таких сосудов составляет примерно 1% в сутки, расход азота — 3—5 л в сутки для сосуда вместимостью 40 л.

## 20. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Использование низких температур при воздействии на свойства различных материалов — сравнительно новая отрасль криогенной и холодильной техники. Традиционным в этой области следует считать лишь обработку пищевых продуктов с целью их длительного хранения.

К использованию холода в машиностроении специалисты пришли в результате анализа изменений, происходящих в различных материалах при длительном воздействии на них низких температур. Такому воздействию детали машин и оборудования подвергаются как в низкотемпературных режимах эксплуатации, предусмотренных технологией, так и в условиях низких температур окружающей среды, например в районах Крайнего Севера.

Установлено, что основные изменения свойств различных материалов с понижением температуры сводятся к увеличению прочности и износостойкости, к снижению ударной вязкости и уменьшению относительного удлинения. Так, при температуре жидкого азота (77 К) предел прочности большинства металлов в 2—5 раз больше, чем при комнатной температуре; прочность некоторых видов пластмасс увеличивается в 8 раз, стекла — в 12 раз [10].

Положительным при таком изменении прочности материалов следует считать увеличение возможности повышения эффективности обработки некоторых материалов, улучшение режущих свойств металлорежущего инструмента, стабилизацию размеров особо точных и эталонных деталей.

Отрицательным моментом при воздействии низких температур на структуру материала являются внутренние изменения структуры, приводящие к разрушению под нагрузкой. Одна из причин хрупкого разрушения сталей — мартенситное превращение аустенита, которое приводит к увеличению объема и снижению ударной вязкости [10].

Напротив, хорошей ударной вязкостью обладает нержавеющая сталь IX18H10T с повышенным содержанием никеля и сплавы на основе алюминия, меди и титана. Эти материалы широко используются в различных элементах конструкций криогенной техники, работающих при низких температурах.

В машиностроении низкие температуры используются для улучшения свойств сталей, стабилизации формы и размеров стальных деталей, обеспечения неподвижных посадок при сборке, а также при изготовлении и обработке резиновых деталей.

При обработке закаленных деталей с целью улучшения свойств металла охлаждением до низких температур

добиваются более полного аустенитно-мартенситного превращения и стабилизации остаточного аустенита.

Диапазон применяемых при таком охлаждении температур довольно широк (от 270 до 150 К). Охлаждение деталей проводят в специальных шкафах-криостатах в среде паров азота или смеси спирта с двуокисью углерода, в охлажденном воздухе.

При охлаждении деталей требуется определенная выдержка их во времени с целью достижения необходимой температуры не только в поверхностных слоях, но и внутри детали.

При использовании охлаждения металлических деталей с целью стабилизации их размеров в основе процесса также лежит превращение остаточного аустенита в мартенсит. Стабилизация размеров и форм точных деталей обычным способом, отпуском или старением может привести к потере твердости материала детали. При охлаждении таких изделий при температурах 210—190 К их размеры и формы удовлетворительно стабилизируются. Особенно эффективно стабилизация размеров осуществляется при чередовании высокотемпературных методов обработки с низкотемпературными.

Использование холода для обеспечения неподвижных посадок при сборке различных узлов механизмов имеет определенные преимущества перед посадками с помощью прессов и посадками, осуществляемыми нагревом. При использовании прессов возможны деформации сопрягаемых деталей, что может привести к снижению надежности сопряжения; при нагреве также возможны большие напряжения и деформации деталей, приводящие к ухудшению прочности.

При низкотемпературном способе охлаждают внутреннюю деталь; при необходимом уменьшении ее наружного размера при охлаждении она может быть установлена в охватывающей детали. При снятии охлаждения возникает необходимый для сопряжения натяг. Такой метод сопряжения единственно возможен при нанесении на сопрягаемые детали антикоррозионных покрытий; в этом случае нагрев деталей невозможен.

При изготовлении и обработке резиновых изделий охлаждение используют как при обработке резиновых заготовок на токарных и фрезерных станках, так и для удаления излишков резины (облоя) после изготовления изделий в пресс-формах.

В первом случае резкое снижение упругости и относительного удлинения резины при охлаждении до температур, близких к температуре жидкого азота, позволяет приблизить технологию обработки резиновых изделий к технологии обработки металлических изделий с использованием аналогичных станков и инструментов.

Охлаждение с целью удаления облоя с формованных резиновых изделий повышает в 8—10 раз производительность труда по сравнению с применяемой ранее ручной обработкой, так как в процессе обработки охлаждается не все изделие, а только тонкий облой, который становится хрупким и легко откалывается в дробильной машине.

Весьма экономично применение охлаждения для замораживания резины перед ее измельчением в процессе переработки, например при утилизации изношенных автомобильных шин. Наиболее рационален способ измельчения резины при сочетании высоких скоростей деформации в машинах ударного действия с низкой (200—210 К) температурой дробления резины.

Кроме перечисленных основных направлений в машиностроении иногда используют охлаждение для гибки трубопроводов, штамповки деталей из листовой стали, анодирования деталей алюминиевых сплавов [10].

Для организации процессов охлаждения деталей в рассмотренных технологических операциях используют либо крио- и хладоагенты в сжиженном состоянии: азот, смесь спирта с двуокисью углерода, смеси льда с солями, либо специально сконструированные холодильные машины.

Среди холодильных машин возможно применение как паровых компрессионных холодильных машин, так и воздушных холодильных машин. Применение последних особенно благоприятно из-за доступности и безвредности воздуха как рабочего тела (многие холодильные агенты, аммиак, углеводороды токсичны или взрывоопасны).

Воздушные холодильные машины могут обеспечить широкий диапазон необходимых температур обработки изделий — от 270 до 80 К и холодопроизводительностей (от сотен ватт до нескольких тысяч киловатт).

Среди различных вариантов подобных машин широкое применение находит воздушная турбохолодильная машина ТХМ-300, разработанная под руководством

В. С. Мартыновского, С. К. Туманского и М. Г. Дубинского.

На рис. 30 представлена схема турбохолодильной машины ТХМ-300 с изображением процессов в ее агрегатах на  $T, s$ -диаграмме.

Воздух из атмосферы через клапан поступает в ранее охлажденный регенератор. Водяные пары, содержащиеся

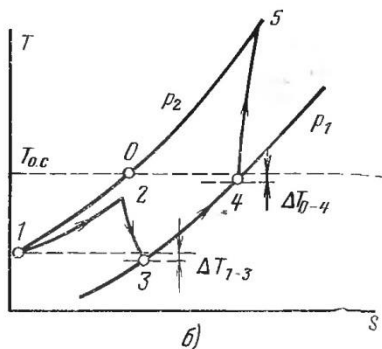
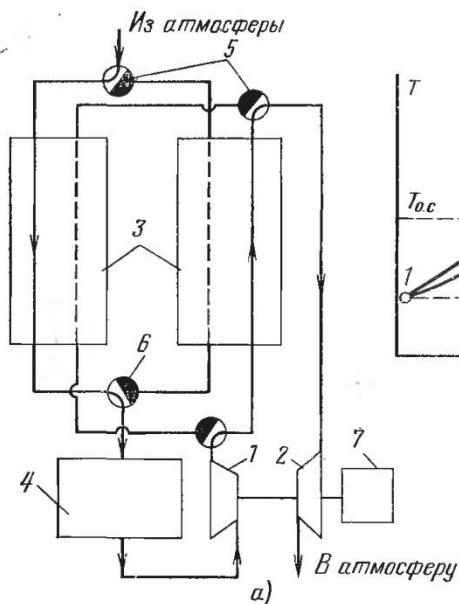


Рис. 30. Схема воздушной турбохолодильной машины ТХМ-300 (а) и термодинамический цикл машины в  $T, s$ -диаграмме (б).

1 — детандер; 2 — компрессор; 3 — регенератор; 4 — холодильная камера; 5, 6 — клапаны; 7 — двигатель.

ся в воздухе, оседают на насадке регенератора, состоящей из гофрированной алюминиевой ленты (процесс 0-1). Охлажденный и осушенный воздух с температурой около 193 К направляется через холодный клапан в холодильную камеру, где нагревается вследствие теплообмена с охлаждаемыми объектами (процесс 1-2). Далее воздух расширяется в турбодетандере до давления  $0,5 \cdot 10^5$  Па, температура его понижается до 190 К (процесс 2-3). Механическая работа с турбин передается компрессору. Затем воздух направляется во второй регенератор, охлаждает его насадку, нагревается и поглощает выпавшую ранее влагу (процесс 3-4). Далее воздух сжимается в компрессоре (процесс 4-5) и выбрасывается в атмосферу.

Оригинальная схема, примененная в этой установке, позволяет отказаться от охлаждения и очистки воздуха после компрессора; установка вообще не требует охлаждающей воды, что позволяет эксплуатировать ее в районах и условиях с дефицитом воды. Воздух перед холодильной камерой проходит только регенератор, что полностью исключает попадание масла в холодильную камеру; это особенно важно при использовании установки для обработки и хранения различных стерильных веществ.

Работа установки при давлениях ниже атмосферного позволяет увеличить размеры проточной части машин, что даже при сравнительно малых массовых расходах определяет высокие значения к. п. д. турбины и компрессора.

При расходе воздуха 1 кг/с установка потребляет 75 кВт мощности при холодопроизводительности около 30 кВт. Температура входа в камеру составляет 193 К.

Использование низких температур при обработке биологических объектов включает в настоящее время не только область умеренных температур, характерную для пищевой промышленности, но и почти всю криогенную область.

Обработка и хранение биоструктур при температурах от 120 до 4К дает возможность длительного сохранения структуры, которое не достигается при умеренном охлаждении. Около года может сохраняться кровь, охлажденная до температуры жидкого азота. Низкие температуры используются при хранении спермы животных, различных тканей и клеток.

Сравнительно новым направлением использования холода следует считать криохирургию. Несмотря на то что холод в медицине известен еще со времени Гиппократата, сейчас это направление переживает период возрождения. Криохирургия позволяет «без крови» проводить сложнейшие операции на мозге. Используется криоинструмент для лечения глазных болезней, злокачественных опухолей. С помощью низких температур (диапазон 190—80 К) можно безболезненно разрушать заданный по объему и форме участок, не воздействуя повреждающе на орган в целом. Процесс разрушения ткани протекает мгновенно, а сам аппарат — криоскальпель — эффективен, прост в эксплуатации, безопасен и удобен. Первые отечественные криоприборы были раз-

работаны в Институте физических проблем АН СССР в 1962 г. В том же году была проведена первая крионейрооперация. Рабочие насадки криоинструмента выполняются в виде иглы, конуса, полусферы. Например, диаметр вводимой в глубину мозга охлаждаемой иглы составляет всего два миллиметра.

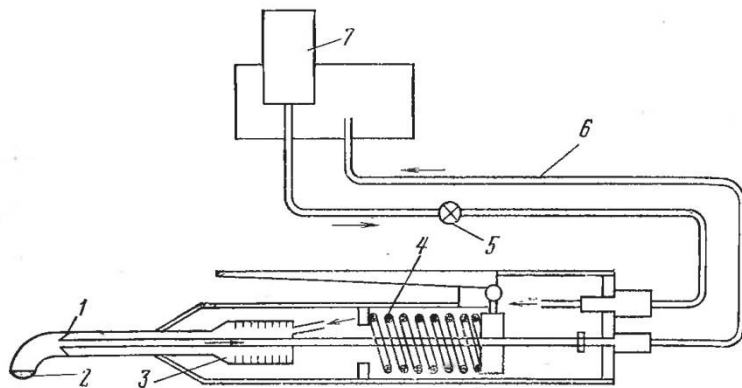


Рис. 31. Схема обеспечения криохирургического инструмента жидким азотом.

1 — дроссель; 2 — наконечник; 3, 4 — теплообменники; 5 — регулирующий и запорный вентили; 6 — патрубок отвода криоагента; 7 — сосуд с криоагентом.

Криоинструмент, как правило, подсоединяется к сосуду с жидким азотом (рис. 31). Жидкий азот подается к наконечнику, а пары его отводятся по коаксиальному каналу. Регулирование температуры наконечника возможно изменением количества подаваемого азота.

## 21. ОХЛАЖДЕНИЕ И КРИОСТАТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Это направление криогенной техники — одно из самых перспективных. На сегодняшний день можно привести примеры успешного применения охлаждаемых электротехнических устройств. К ним относятся первые экспериментальные конструкции сверхпроводящих и криорезистивных<sup>1</sup> генераторов и двигателей, охлаждае-

<sup>1</sup> Криорезистивными называют элементы электротехнических устройств, выполненных из чистых металлов (Cu, Al, Be), охлаждение которых производится до температур 15—80 К, при этом их омическое сопротивление снижается до некоторого малого значения.



мые магниты, экспериментальные линии электропередач. Не меньшее число таких примеров ожидает нас в ближайшей перспективе.

Явление сверхпроводимости — физическая основа этого направления — было открыто голландским физиком Камерлинг-Оннесом в 1911 г. Однако до сих пор, спустя 70 лет, многие прикладные вопросы по созданию сверхпроводящих устройств остаются проблематичными из-за технических трудностей реализации и экономических соображений.

Рассмотрим подробнее существо явления, открытого Камерлинг-Оннесом. При изучении изменения электрического сопротивления ртути с температурой он обнаружил полное исчезновение сопротивления при температуре жидкого гелия. Поскольку зафиксировать точное нулевое значение сопротивления не позволяла измерительная техника, он предпринял опыт, позволяющий косвенно доказать существование нового явления.

Катушка из сверхпроводящего свинцового провода, помещенная в сосуд Дьюара с жидким гелием (рис. 32), замыкалась накоротко переключателем 2. Переключатель 1 при разомкнутом переключателе 2 соединял катушку с источником тока. Ток, проходящий через катушку, создавал вокруг нее магнитное поле, фиксируемое отклонением магнитной стрелки.

При замыкании ключа 2 и размыкании ключа 1, т. е. отключении источника питания, стрелка продолжала отклоняться, показывая, что по катушке проходит ток, свидетельствуя о полном отсутствии в материале сопротивления.

Отклонение стрелки наблюдалось в течение длительного периода времени, в течение которого в сосуде находился жидкий гелий. Камерлинг-Оннес предпринял также впоследствии попытки технического использования открытого явления для создания обмотки электрической машины. Однако при достижении некоторого

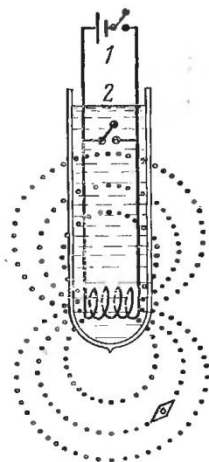


Рис. 32. Схема эксперимента Камерлинг-Оннеса.

значения магнитного поля, названного впоследствии критическим, сверхпроводимость исчезла.

При современном состоянии проблемы использования охлаждаемых токопроводящих элементов электротехнических устройств решение идет по пути создания как сверхпроводящих элементов, криостатируемых при температуре жидкого гелия, так и криореистивных, температура охлаждения которых определяется более высоким уровнем криогенных температур. Разумеется, при решении этой задачи одним из главных вопросов остается материал сверхпроводящего или криореистивного проводника.

Рассмотрим некоторые технические задачи, решаемые с помощью криореистивных или сверхпроводящих устройств.

*Сверхпроводящие генераторы и двигатели переменного и постоянного тока.* Использование охлаждаемых обмоток в электрических машинах представляется одним из реальных применений сверхпроводимости в электроэнергетике.

Для советской энергетики прирост мощностей предусматривается главным образом посредством увеличения единичной мощности агрегатов. Несмотря на созданные уже мощные агрегаты-гиганты, такие как паровая турбина и генератор мощностью 1200 тыс. кВт для Костромской ГРЭС, дальнейший рост единичной мощности ограничен значениями в 2,5—3 млн. кВт. Это объясняется возрастанием потерь энергии на сопротивление в обмотках, непрочностью материала ротора при больших центробежных нагрузках, возрастанием расходов на систему охлаждения и др.

В криогенном турбогенераторе многие из этих проблем отпадают, так как становится возможным создать машину с высоким к. п. д., значительно уменьшить массу и габариты генератора и потери на нагрев его обмоток.

Задача создания сверхпроводящих машин предусмотрена в решениях XXV съезда КПСС, где записано: «Ускорить работы по созданию мощных генераторов с использованием принципа сверхпроводимости».

Принципиальная схема электрического генератора со сверхпроводящей обмоткой показана на рис. 33.

Ротор такой машины представляет собой криостат, в который подается жидкий гелий при температуре около

4 К. Сверхпроводящая обмотка возбуждения помещена во внутренней полости ротора. Ротор теплоизолирован в вакуумном кожухе и имеет вращающийся экран, охлаждаемый при температуре около 20 К. Обмотка якоря защищена снаружи магнитным экраном, охлаждаемым водой.

По данным, приведенным в [19], создание такого генератора позволяет значительно уменьшить массу и га-

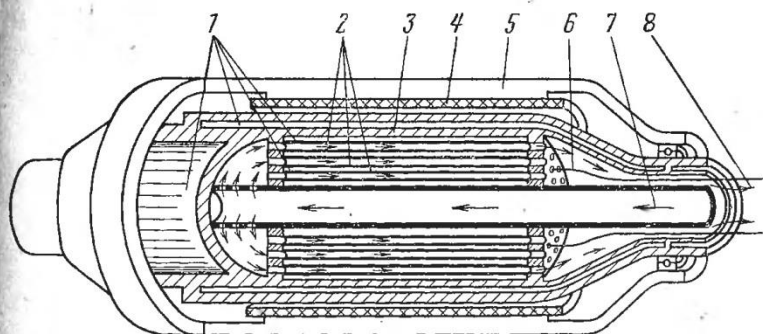


Рис. 33. Конструктивная схема сверхпроводящего синхронного генератора.

1 — вакуумная изоляция; 2 — сверхпроводник; 3 — ротор; 4 — статор; 5 — корпус; 6 — тоководы; 7 — вход гелия; 8 — выход гелия.

бариты по сравнению обычным прототипом. Так, при мощности 1300 МВт длина сверхпроводящего генератора почти вдвое меньше, чем обычного, а масса снижается почти в 3 раза. Коэффициент полезного действия такой машины высок и составляет примерно 98%.

В Советском Союзе электромашиностроителями объединения «Электросила» в содружестве с учеными АН УССР создан опытный криотурбогенератор мощностью 1000 кВт при диаметре ротора 770 мм. Обмотка ротора выполнена из сплава ниобия и титана. В программе объединения — создание криотурбогенератора мощностью несколько тысяч киловатт, а затем и изготовление промышленного трехсоттысячного агрегата.

Перспективны сверхпроводящие двигатели и генераторы для воздушного и водяного транспорта, где их применение дает большой эффект в экономии энергии, габаритах и массе.

Применение сверхпроводящих магнитов в высокоскоростном наземном транспорте. Это направление — одно

из многих, где криогенное охлаждение применяется для создания сильных магнитных полей. Размеры и масса магнитов при этом по сравнению с неохлаждаемыми существенно уменьшаются.

Несмотря на совершенствование обычного наземного транспорта, его скоростные возможности ограничены уровнем скорости около 250 км/ч. При таких скоростях движения возрастают требования к качеству пути, стабилизации движения.

В то же время по таким показателям, как расходы энергии на пассажиро-километр и площадь, занимаемая транспортным средством в расчете на одного пассажира, железнодорожный и общественный шоссейный транспорт имеют лучшие показатели, чем автомобили и самолет. Так, по данным [19] высокоскоростной экспресс железнодорожной линии «Нью — Токайдо» в Японии имеет расход энергии на одного пассажира  $0,6 \cdot 10^6$  Дж/км и площадь на одного пассажира  $0,96 \text{ м}^2$ . Аналогичные показатели для одного из наиболее экономичных автомобилей «Фольксваген» составляют  $0,6 \cdot 10^6$  Дж/км и  $1,95 \text{ м}^2$ , а для самолета «Боинг-707» соответственно  $1,2 \cdot 10^6$  Дж/км и  $10,9 \text{ м}^2$ .

Проблема создания экономичных наземных скоростных железнодорожных магистралей весьма актуальна для районов с большими пассажиропотоками и большой плотностью населения.

Особые усилия в этом направлении прилагают ученые Японии и ФРГ.

По оценкам японских специалистов, на линии «Нью — Токайдо» протяженностью между Токио и Осакой в 515 км достигнуты предельные скоростные показатели. Это расстояние экспресс, созданных в 1964 г., проходит за 3 ч 10 мин.

На проектируемых линиях сверхскоростного поезда на магнитном подвесе предполагается достигнуть скоростей 350—500 км/ч. Принцип, на котором основана система транспорта на магнитном подвесе, состоит в том, что сверхпроводящие магниты, движущиеся с поездом, индуцируют в металле путепровода токи: взаимодействие их с полем сверхпроводящих магнитов создает магнитную силу, обеспечивающую подъем поезда.

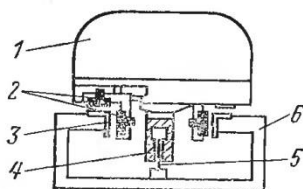
Стабилизация движущегося состава достигается ориентацией его относительно вертикальной и горизонтальной осей симметрии (рис. 34). При смещении поезда от

положения оси симметрии возникают нескомпенсированный магнитный поток и ток, которые создают магнитную силу, возвращающую систему в исходное положение.

Для приведения поезда в движение возможно использование автономного двигателя, ибо при больших скоростях обычные методы энергоснабжения непригодны. Так, при скоростях около 300 км/ч нормальная эксплуа-

Рис. 34. Схема привода и стабилизации поезда на магнитном подвесе.

1 — вагон; 2 — сверхпроводящие магниты; 3 — проводящий экран для создания подъемной силы и обеспечения устойчивости; 4 — линейный двигатель; 5 — реактивный направляющий рельс; 6 — бетонная опора.



тация токосъемников контактного провода невозможна из-за больших вибраций.

Наиболее перспективен для поездов на магнитном подвесе линейный электродвигатель. Он представляет собой устройство, в котором обмотка обычного двигателя разрезана по цилиндрической образующей и уложена на плоскости. Для обеспечения относительного движения между его элементами оставляется необходимый воздушный зазор. Поле сверхпроводящих магнитов подвеса может быть использовано и в системе движения.

Первые испытания моделей таких магнитопоездов уже проведены.

В Японии в 1972 г. проведены испытания модели массой в 3,5 т с четырьмя сверхпроводящими магнитами [19]. Модель поднималась во время движения по пути на 5 см и прошла путь около 200 м на линейном индукционном двигателе.

В 1975 г. в Москве на XIV Международном конгрессе по холоду учеными ФРГ было сделано сообщение об испытании высокоскоростной транспортной системы на кольце диаметром 280 м. Масса состава достигала 18 т при скорости 200 км/ч. Последние достижения в этой области относятся к испытанию вагона массой в 10 т на отрезке пути в 3 км с максимальной скоростью 315 км/ч.

*Сверхпроводящие линии электропередачи.* Проблема транспорта энергии от места ее выработки к потребителю усложняется в связи с ростом ее выработки.

Ежегодный рост потребления электроэнергии в крупных промышленно развитых странах составляет примерно 7%, что означает удвоение потребления примерно через 10 лет.

Одновременно возрастают и единичные мощности энергетических блоков. Для передачи энергии в современных линиях электропередачи используется напряжение 500 и 700 кВ, позволяющее передавать по воздушным линиям электропередачи мощности около 1 млн. кВт. Испытываются воздушные линии 1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока. Однако для передачи больших мощностей из Сибири в европейскую часть территории СССР такие напряжения оказываются недостаточными [22]. В то же время при напряжении в 1 млн. вольт воздух перестает быть надежным изолятором. С ростом передаваемого напряжения значительно (до 2—3 км) увеличивается ширина коридора для воздушной линии электропередачи, возрастает высота опор.

В линиях передач электроэнергии теряется до 15—25% вырабатываемой энергии. Лишь около трети первоначальной стоимости электроэнергии, доставленной к месту потребления, составляет ее производство; основную часть ее стоимости составляют передача и распределение. Одним из перспективных методов решения этой проблемы становится, несомненно, создание криогенных линий электропередачи. Использование низких температур здесь предполагается как для дальнего транспорта электроэнергии, так и для обеспечения ввода в большие города.

Создание криогенных линий электропередачи предусматривает принципиально два варианта: использование чистых металлов — меди, алюминия, охлаждаемых при температурах 15—20 К жидким водородом или смесью водород — гелий (так называемые криореактивные электропередачи), и применение сверхпроводников (ниобий — цирконий, ниобий — титан, ниобий — олово и др.), охлаждаемых при температурах 6—15 К, в сверхпроводящих линиях электропередачи.

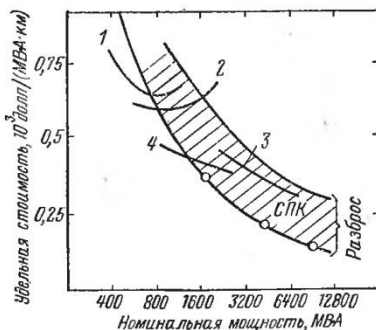
Предпочтение тому или иному методу охлаждения можно отдать только по результатам технико-экономических расчетов. Удельные затраты на криогенное обеспе-

чение линий электропередачи снижаются обратно пропорционально мощности передачи. Поэтому существуют определенные значения мощностей, при которых техническая реализация криогенной линии электропередачи рациональна.

На рис. 35, приведенном по данным [19], дается сопоставление затрат на передачу энергии с помощью сверхпроводящей линии электропередачи (СПЛЭП) и других

Рис. 35. Зависимость удельной стоимости передачи энергии различными способами от мощности [19].

1 — маслонаполненный кабель высокого давления переменного тока; 2 — маслонаполненный кабель высокого давления с принудительным охлаждением; 3 — газонизолированный кабель; 4 — криорезистивный кабель.



линий электропередачи. Из анализа кривых рис. 35 видно, что основными конкурентами сверхпроводящего кабеля следует считать газонизолированный кабель, криорезистивный кабель с охлаждением жидким азотом и маслонаполненный кабель высокого давления с принудительным охлаждением.

Один из примеров конструктивного выполнения кабеля для СПЛЭП переменного тока мощностью 3000 МВ·А, разработанного в Брукхэвенской национальной лаборатории (BNL) в США, показан на рис. 36.

Собственно сверхпроводящий кабель, охлаждаемый жидким гелием, помещен в оболочку, защищенную от теплового воздействия промежуточным тепловым экраном и вакуумно-многослойной изоляцией. В качестве сверхпроводящего материала используется слой ниобия, нанесенный на медную трубку.

Большой интерес представляют гибкие сверхпроводящие кабели, в которых отдельные жилы сверхпроводника монтируются на гибкой круглой трубе. Такие кабели можно намотать на барабаны больших диаметров.

Технико-экономические расчеты американских и японских специалистов показывают, что такие кабели

целесообразно использовать для передачи переменного тока при мощности 2000—3000 МВт, а постоянного — более 5000 МВт с напряжением до 500 кВ.

*Использование криогенного охлаждения для магнитной системы МГД генератора.* Стремление повысить термодинамическую эффективность процесса преобразования теплоты в электрическую энергию привело к созданию установок с МГД генератором. Исследования и разработки в этом направлении в последние 20 лет ведутся

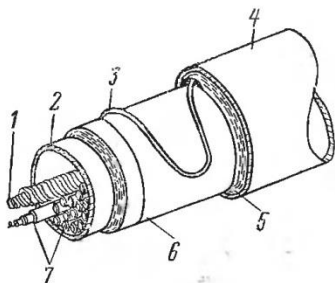


Рис. 36. Подземный кабель для СПЛЭП переменного тока мощностью 3000 МВА, разработанный в BNL [19].

1 — труба обратного потока гелия; 2 — внутренняя стенка Дьюара; 3 — охлаждающая трубка, припаянная к экрану; 4 — наружная стенка Дьюара; 5 — вакуумно-многослойная изоляция; 6 — промежуточный тепловой экран; 7 — сверхпроводящие кабели.

в Советском Союзе и за рубежом. При использовании потока электропроводного газа (плазмы) с температурой 2500—3000°C в МГД генераторе можно достигнуть к. п. д. около 50—60 вместо 40—42% на самых современных тепловых электростанциях. На МГД генераторе снижаются также и расходы топлива и охлаждающей воды.

Следует при этом отметить, что наиболее целесообразно использовать МГД цикл как высокотемпературную надстройку к циклу паросиловой станции.

Схематическое изображение МГД генератора показано на рис. 37. Рабочее тело, представляющее собой газ (воздух) с ионизирующей добавкой, нагретое до высокой температуры в ионизированном состоянии (состоянии плазмы), расширяется в сопле и со скоростью около 1000 м/с поступает в канал генератора. Канал находится в магнитном поле, создаваемом магнитной системой. При пересечении проводником силовых линий магнитного поля в проводнике возникает э. д. с. С помощью электродов генерируемая электроэнергия отводится потребителю.

Использование криогенного охлаждения позволяет значительно уменьшить размеры магнитной системы, уменьшить расход энергии на магнит, а увеличение нап-



ряженности поля в сверхпроводящем магните по сравнению с обычным приводит к уменьшению рабочей длины канала. Особенно целесообразно применение сверхпроводящей магнитной системы для МГД генераторов транспортных объектов, в частности орбитальных станций.

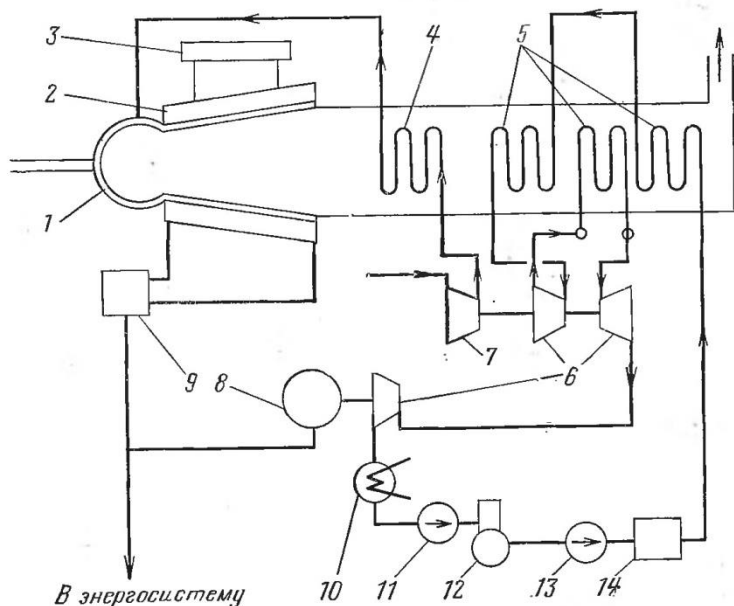


Рис. 37. Принципиальная схема МГД генератора со сверхпроводящим магнитом.

1 — канал; 2 — магнит; 3 — охлаждение магнита; 4 — воздухонагреватель; 5 — пароперегреватель; 6 — паровая турбина; 7 — воздуходувка; 8 — генератор; 9 — преобразователь; 10 — конденсатор; 11, 13 — насосы; 12 — деаэрактор; 14 — подогреватель. В воздуходувку 7 поступает воздух, обогащенный кислородом.

Наиболее крупная МГД установка мощностью 20 тыс. кВт создана и работает в Советском Союзе более 4000 ч.

Другие примеры применения криогенного охлаждения в электротехнических устройствах сводятся в основном к разнообразным областям использования сверхпроводящих и криорезистивных магнитов для различных технических целей. Во всех этих случаях превостепенным является создание экономичной и надежной магнитной системы.

На рис. 38 показана одна из типичных схем криогенного обеспечения сверхпроводящего магнита. Катушка магнита охлаждается жидким гелием, поступающим из ожижителя или запасенным в сосуде Дьюара. Такая схема обеспечения характерна для малых магнитов, в которых допустимо охлаждение погружением в кипящий

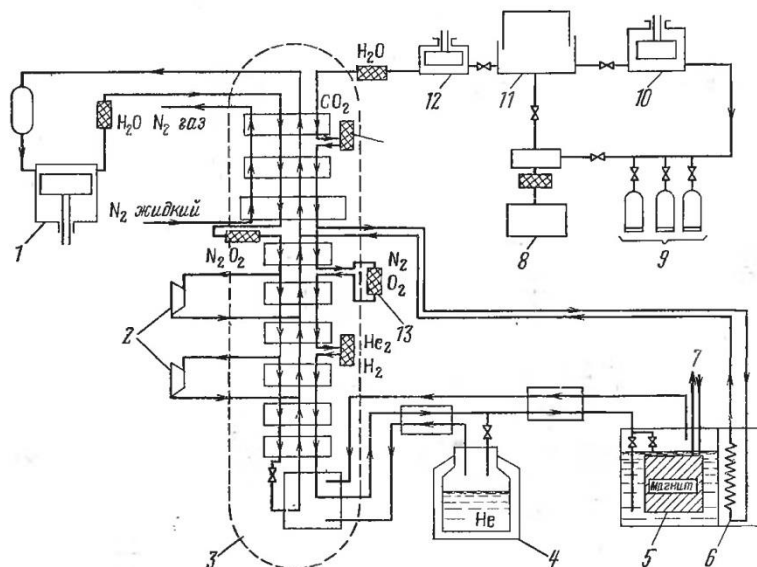


Рис. 38. Схема криогенного обеспечения сверхпроводящего магнита. 1 — компрессор; 2 — турбодетандеры; 3 — криоблок; 4 — сосуд Дьюара с жидким гелием; 5 — магнит; 6 — азотный экран магнита; 7 — токовводы; 8 — загрязненный газообразный гелий; 9 — баллоны с чистым гелием; 10 — компрессор закачки гелия; 11 — газгольдер; 12 — компрессор высокого давления; 13 — очистка гелия от примесей.

гелий. В крупных магнитных системах охлаждение осуществляют циркуляцией сжатого газообразного (при  $p > p_{кр}$ ) или двухфазного потока гелия по полой сверхпроводящей шине. В перспективе станет возможным использование сильного магнитного поля, создаваемого сверхпроводящим магнитом, для магнитной сепарации с целью выделения ферромагнитных и парамагнитных материалов из руд, в каолиновой промышленности — для удаления магнитных загрязнений из глины. Перспективно, хотя пока еще мало разработано, использование магнитов для обогащения угля: выделения из него мине-

ральных составляющих, таких как пирит, содержащий серу.

В связи с увеличением работ по защите окружающей среды; в частности очистке сточных вод, перспективно применение для этих целей магнитной сепарации: в сточные воды, подлежащие очистке, вводятся измельченные окислы железа для поглощения твердых частиц и бактерий, которые затем отделяются в магнитном поле.

Среди перспективных применений сверхпроводимости несомненно следует считать создание термоядерной установки.

Решение проблем термоядерного синтеза создает прочную основу обеспечения энергией в будущем, так как основано на использовании в качестве топлива дейтерия (тяжелого водорода), запасы которого в природе неограниченны.

Создание термоядерных систем с магнитным удержанием плазмы требует сильных магнитных полей. Использование сверхпроводящих катушек, охлаждаемых гелием при температуре 4,5 К, существенно сокращает затраты энергии на обеспечение процесса.

Созданные в Советском Союзе термоядерные системы с магнитным удержанием плазмы названы «Токамак». Эта аббревиатура составлена из начальных букв основных элементов системы: ток, катушка, магнит, камера.

В 1978 г. в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова успешно проведены испытания системы «Токамак-7» — первой в мире крупной термоядерной установки со сверхпроводящими тороидальными магнитными обмотками. Плазма с температурой в несколько миллионов градусов удерживалась в магнитном поле с индукцией 2,4 Тл.

В системе «Токамак» (рис. 39) плазма 1 удерживается тороидальным полем, образованным рядом дискообразных сверхпроводящих катушек 2 тороидального поля.

Другая группа сверхпроводящих катушек реактора при быстром изменении тока наводит в плазме кольцевой ток, который нагревает и стабилизирует ее.

Система «Токамак» — не единственный способ решения проблемы термоядерного синтеза: ученые работают над созданием лазерного термоядерного реактора, основанного на микровзрывах ядерных мишеней, вызываемых лазерными лучами.

Не менее значительным применением сверхпроводимости будет создание накопителей энергии, необходимых для резервирования энергии с целью покрытия пиковых нагрузок, неизбежно возникающих при неравномерном потреблении энергии.

В индуктивном накопителе при избытке энергии катушка запитывается, а при ее дефиците — может быть разряжена на потребителя.

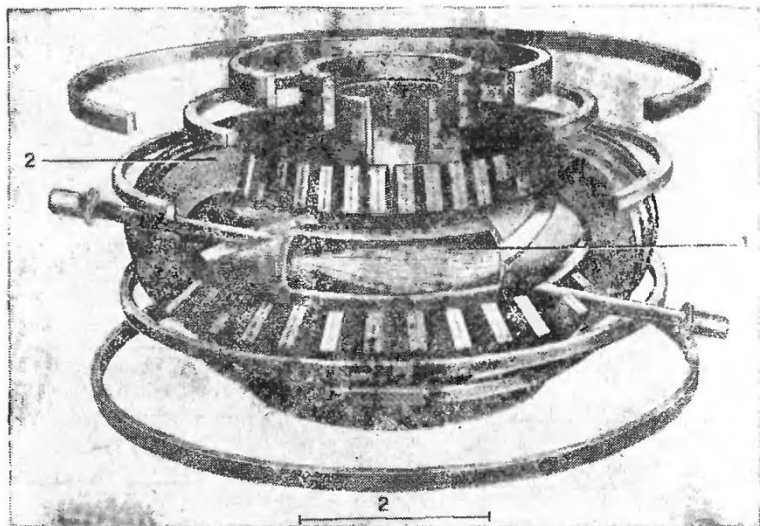


Рис. 39. Термоядерный реактор «Токамак».

Схема индуктивного накопителя энергии со сверхпроводящей катушкой показана на рис. 40 [22].

Сверхпроводящая катушка  $L$  заряжается при замкнутом выключателе  $B_1$  и разомкнутых выключателях  $B_2$  и  $B_3$ . Переменное сопротивление  $R$  предназначено для регулирования времени заряда. При накоплении необходимого количества энергии выключатель  $B_3$  замыкается, а выключатель  $B_1$  размыкается, отключая накопитель от источника энергии. Сверхпроводящий выключатель  $B_3$  обеспечивает циркуляцию тока в цепи 2. Подсоединение нагрузки осуществляется замыканием  $B_2$  и размыканием  $B_3$ .

Использование подобных накопителей может быть экономически оправдано, если они будут по стоимости и надежности конкурентоспособны с другими способами аккумуляирования энергии, используемыми в настоящее время, например с гидроаккумулирующими электростанциями, запасующими энергию с помощью насосов, топливными элементами и газовыми турбинами.

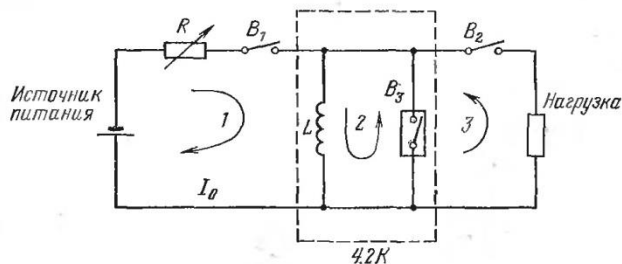


Рис. 40. Индукционный накопитель энергии.

Сверхпроводящие магнитные системы перспективны и в космических исследованиях.

Магнитные экраны со сверхпроводящими обмотками, в которых создается поле, по значению близкое или превышающее земное, будут использоваться для защиты космических кораблей и орбитальных комплексов от воздействия потоков космических частиц.

Используется магнитное поле также для изучения воздействия на живые организмы.

## 22. СНИЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЭЛЕМЕНТАХ ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Это направление, охватывающее область работы различного криоэлектронного оборудования, или криоэлектроники, также сравнительно молодо.

Охлаждение до криогенных температур чувствительных элементов электронных приборов стало необходимым, когда были исчерпаны возможности радиоэлектронной аппаратуры, достижимые в обычном интервале температур.

С другой стороны, создание криоэлектронных приборов стало возможным при определенном прогрессе в промышленном производстве рефрижераторов и ожижителей специального типа — малых размеров и холодо-

производительностей. Отрасль, в которой сосредоточено производство подобной уникальной аппаратуры, названа микрокриогенной техникой.

Наконец, главной причиной развития криоэлектроники стало расширение космических исследований.

Основой для создания криоэлектронных приборов стали результаты исследований, достигнутые в физике твердого тела при низких температурах, относящиеся к изучению неупорядоченности структуры вещества.

Материалы чувствительных элементов, применяемых в электронных приборах, оценивают по степени неупорядоченности химической и геометрической структур, а также кинетической энергией движения частиц вещества (температурой).

Каждый из этих факторов неупорядоченности приводит к увеличению электрического сопротивления материала, внесению помех в воспринимаемый прибором сигнал, уменьшению амплитуды и искажению сигнала.

Так, например, нарушение химической чистоты медного металлического проводника добавлением 0,1% фосфора приводит к уменьшению его проводимости примерно на 50%.

В химически чистом материале может быть нарушена внутренняя геометрическая структура вследствие напряжений, возникающих при механической обработке. Так, после холодной протяжки удельное сопротивление меди возрастает на несколько процентов. Кинетическая неупорядоченность, вызванная движением свободных электронов в проводнике или тепловыми колебаниями атомов в решетке любого твердого тела, значительно снижается при охлаждении вещества.

Для охлаждения чувствительного элемента электронного прибора и снижения неупорядоченности, вызванной перечисленными выше причинами, используют фактически весь интервал криогенных температур, однако большинство криогенных систем, чаще всего используемых в радиоэлектронике, работает при азотных (70—80 K) и гелиевых (4—10 K) температурах.

К числу основных приборов радиоэлектроники относят приемники инфракрасного излучения теплового (болюметр) и фотонного (фотосопротивление) типов, квантовые генераторы и усилители. Последние применяют для дальней космической связи, для радиолокации планет [6, 17, 22].

Основными характеристиками систем криообеспечения электронных объектов являются температура криостатирования  $T_0$  и холодопроизводительность на установленном режиме.

Характерные рабочие температуры криостатирования электронных устройств отвечают интервалу 100—4 К. Максимальные значения холодопроизводительностей на азотном уровне температур составляют 100—150 Вт, на гелиевом — 2—2,5 Вт.

К устройствам криогенной электроники предъявляют особые требования по потреблению энергии, массе, габаритам, длительности в работе и надежности, так как эти установки используют чаще всего именно на объектах с лимитированными возможностями в энергоресурсах, ограничениями по массе и габаритам. Типичным представителем такого объекта можно назвать космический аппарат, криогенное обеспечение которого получает все большее развитие<sup>1</sup>. Криогенные установки обеспечения электронной аппаратуры можно условно разделить на три группы [18].

К первой группе относятся наиболее простые системы, радиационные, основанные на непосредственном использовании теплообмена с окружающей средой. В космосе с их помощью относительно просто осуществить криостатирование объектов при температурах 100—150 К, используя низкую температуру окружающей среды. Обычно такой метод охлаждения применяется для объектов с очень малым тепловыделением, но он пригоден для обеспечения ресурса работы 1—2 года и более.

Вторая группа включает так называемые системы расходного типа с твердыми, жидкими и сжатыми газообразными криоагентами. Они также просты и достаточно надежны в эксплуатации. Эти системы могут обеспечивать криостатирование во всем интервале криогенных температур при относительно невысоких тепловыделениях объекта, но срок их работы ограничен.

Третья группа объединяет большое число разнообразных систем машинного типа, более сложных, но и более эффективных. Диапазон температур, обеспечиваемых с помощью этих систем, широк, а нижний температурный предел составляет 3,5—4,4 К. Такие системы наибо-

---

<sup>1</sup> В этом параграфе под криогенным обеспечением космического корабля понимаются только системы обеспечения электронных устройств.

лее привлекательны при большом требуемом сроке службы, поскольку их массовые характеристики слабо зависят от времени.

Несмотря на то что радиационный способ обеспечения криогенных температур привлекателен своей простотой, а следовательно, высокой надежностью, его применение ограничено размерами радиационных поверхностей, которые лимитируют полезную холодопроизводительность. Максимальная мощность, диссипируемая радиатором в космическое пространство, составляет около 100 Вт. Такие радиаторы применяют для поддержания температуры детекторов электронных оптических систем.

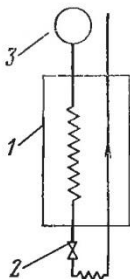


Рис. 41. Дроссельная расходная система.

Системы с незамкнутым процессом — наиболее распространенный тип систем криостатирования, отличающихся большим разнообразием. Особенность этих систем в простоте, надежности и относительной экономичности.

Дроссельная система разомкнутого типа (рис. 41) состоит из теплообменника 1, дросселя 2<sup>1</sup> и небольшого баллона 3, в котором содержится рабочее тело в виде газа высокого давления. Сжатый газ предварительно охлаждается в теплообменнике, проходит через дроссельное устройство. В установившемся режиме к рабочему телу подводится теплота от охлаждаемого объекта и далее газ через теплообменник выбрасывается в окружающую среду.

Дроссельная система может быть выполнена также и замкнутого типа; в такой системе вместо баллона со сжатым газом используется компрессор высокого давления. Она применяется в устройствах длительного действия, и в этом ее преимущество по сравнению с разомкнутой. Однако появление в схеме компрессора значительно усложняет систему.

В системах разомкнутого типа может быть использован и жидкий криоагент. Такие устройства применяют в системах с ограниченным сроком хранения и малой длительностью рабочего цикла.

<sup>1</sup> В большинстве случаев в качестве дросселя применяется калиброванное отверстие малого диаметра.



В последние 10—15 лет исследуются и проектируются разомкнутые системы с твердотельными криоагентами, основанные на сублимации замороженных газов. Такие устройства также разнообразны по схемам использования криоагента.

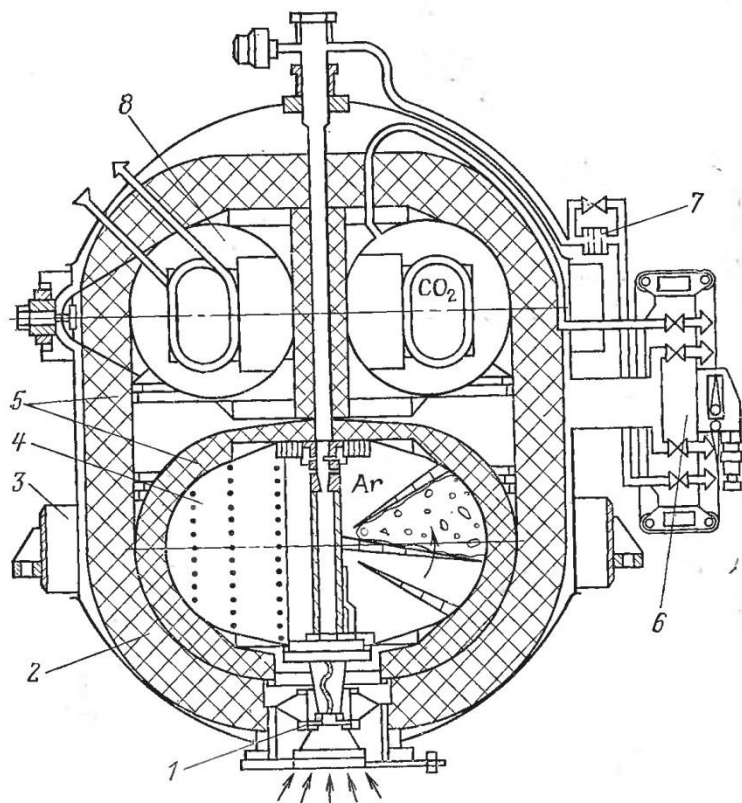


Рис. 42. Сублимационный аккумулятор холода КТ-12.

1 — объект криостатирования; 2 — экран; 3 — корпус; 4 — полость рабочего криоагента; 5 — изоляция; 6 — пироблок; 7 — дроссель; 8 — полость охранного криоагента.

На рис. 42 представлена конструктивная схема сублимационного аккумулятора холода (САХ) КТ-12, предназначенного для длительного охлаждения полупроводниковых детекторов рентгеновского и инфракрасного диапазонов [24].

Конструктивно САХ КТ-12 устроен следующим образом.

В герметичном наружном корпусе 3, состоящем из цилиндрической обечайки с двумя силовыми поясами и двух эллиптических днищ, размещены полости рабочего 4 и охранного 8 криоагентов. В качестве рабочего криоагента использован твердый аргон, в качестве охранного — твердый  $\text{CO}_2$ .

Пространства между полостями, а также между наружным корпусом и полостью охранного криоагента с экраном 2 заполнены слоисто-вакуумной изоляцией (СВИ) 5 и откачаны до давления не выше  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па.

Пироблок 6 предназначен для сообщения дренажных магистралей и изолирующей полости САХ с вакуумом космического пространства с целью поддержания заданных температур криокомпонентов. Получение необходимых температур в диапазоне 55—80 К обеспечивается дросселем 7, установленным на дренажной магистрали аргона.

Объект охлаждения 1 установлен в нижней части рабочей полости и для уменьшения градиента температур закреплен через индиевую прокладку. С целью снижения теплопритоков по узлу датчика все его элементы, за исключением рабочей площадки, экранированы температурой охранного криоагента.

В советской печати сообщалось о проведении на станции «Салют-4» космонавтами А. Губаревым и Г. Гречко экспериментов в области инфракрасной, ультрафиолетовой и рентгеновской астрономии. Приемник излучения в этой установке был совмещен с сублимационным аккумулятором холода, предложенным сотрудниками Физико-технического института низких температур АН УССР.

В криостате помещался твердый азот. Во время эксперимента на орбите открывался регулируемый клапан криостата, и с помощью вакуума космоса осуществлялась откачка паров над поверхностью твердого азота, обеспечивая температуру криостатирования приемника излучения на уровне 50 К.

Аппаратура надежно работала в течение длительного периода, обеспечивая стабильную температуру объекта без потребления энергии.

Рефрижераторы систем машинного типа выполняют по схемам, использующим циклы Брайтона или Клода с

турбомашинами или поршневыми машинами и циклы Стирлинга с газовыми машинами.

Возможности работы рефрижератора в транспортной установке во многом определяет источник электропитания. У рефрижераторов, работающих на электроэнергии, таким источником служат панели с солнечными батареями или автономные системы электропитания с тепловыми двигателями, которые получают энергию от ядерных изотопов или от Солнца.

В зарубежных исследованиях приводятся данные об испытаниях миниатюрных рефрижераторов с использованием поршневых машин. Для обеспечения надежности в этих машинах как в компрессоре, так и в детандере поршневые устройства не имеют контактных поверхностей скольжения: поршень одновременно с возвратно-поступательным движением вращается. Это позволяет создать условия для длительной работы машин. Энергетические показатели такой системы достаточно высоки. По данным [6] криогенная система на уровне температур криостатирования 77 К и холодопроизводительностью 2 Вт потребляет энергию около 80 Вт и имеет эксергетический к. п. д. около 7%, что следует считать высоким показателем для таких малых систем.

В последние 10—20 лет ведется исследование и проектирование систем криостатирования с турбомашинами, проходят испытания отдельные элементы рефрижераторов: компрессоры, детандеры, теплообменники [18].

Для таких систем характерны высокие частоты вращения роторов компрессора и турбодетандера, применение газовых опор и электрогенераторов для торможения турбодетандера.

При сопоставимых с рефрижераторами на поршневых машинах холодопроизводительностях (1—2 Вт) компрессоры и турбодетандеры имеют малые размеры и довольно низкую эффективность (к. п. д. компрессора около 20%, к. п. д. турбодетандера около 30%), обусловленную, кроме обычных газодинамических потерь, большими потерями на трение диска и вала о газ и на трение в подшипниках. Низкие к. п. д. машин определяют и низкий к. п. д. всего рефрижератора.

При большей холодопроизводительности относительные потери уменьшаются, что значительно улучшает к. п. д. и уменьшает массу и потребляемую мощность рефрижератора на единицу вырабатываемого холода.

В работе [18] имеются данные о создании рефрижератора холодопроизводительностью 2 Вт на уровне 4,4 К. Принципиальная технологическая схема рефрижератора представлена на рис. 43. Для сжатия гелия от давления обратного потока 0,115 МПа до давления прямого потока 0,3 МПа применен трехступенчатый вихревой компрессор с к. п. д. каждой ступени около 30%. Массовый

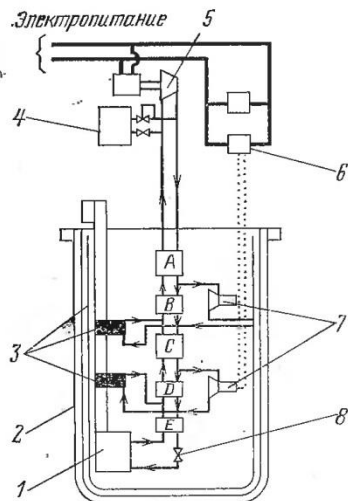


Рис. 43. Технологическая схема рефрижератора, работающего по циклу Клода.

А, В, С, D, Е — теплообменники криоблока; 1 — криостатируемый объект; 2 — криостат; 3 — экраны; 4 — ресивер; 5 — вихревой компрессор; 6 — блок нагрузки генераторов турбодетандера; 7 — турбодетандеры; 8 — дроссель.

расход гелия через компрессор 2,8 г/с. Вихревой компрессор имеет преимущество перед центробежным, так как при меньшем числе ступеней в нем возможно создание больших напоров.

Далее газ охлаждается последовательно в ступенях, состоящих из регенеративных теплообменников и турбодетандеров. Значительные теплопритоки в системах такого типа, а также малые размеры турбодетандеров приводят к тому, что последние выполняются герметичными с генераторным торможением и полностью размещаются внутри криоблока.

Теплообменники выполнены из системы коаксиальных трубок по принципу противотока и отличаются высокой термической эффективностью. В схеме применены турбодетандеры активного типа.

При частоте вращения рабочего колеса 205 200 об/мин электрическая мощность, отдаваемая детандером, со-

ставляет 33 Вт, к. п. д. турбодетандера 37%. Эксергетический к. п. д. рефрижератора составляет около 2%.

В феврале 1978 г. в Советском Союзе на борту орбитального научно-исследовательского комплекса «Салют-6» — «Союз-27» космонавтами Г. Гречко и Ю. Романенко были проведены эксперименты с бортовым субмиллиметровым телескопом БСТ-1М с использованием криогенной системы замкнутого типа для охлаждения приемников излучения.

Изучение субмиллиметрового диапазона представляет интерес, так как эти излучения поглощаются водяными парами атмосферы и не достигают поверхности земли. В то же время субмиллиметровые волны несут информацию о «холодных» объектах Вселенной: темных облаках, скоплениях межзвездной пыли, сложных молекулах межзвездного пространства.

Для повышения чувствительности полупроводниковых приемников излучения площадью  $5 \times 5$  мм и снижения паразитических тепловых «шумов» было использовано гелиевое охлаждение.

Гелиевая криогенная система замкнутого типа, примененная в этом эксперименте, состоит из компрессора, двух газовых холодильных машин, промежуточных теплообменников и дроссельного устройства. Система обеспечивает охлаждение гелия до 4,2 К, весит немногим более 130 кг и потребляет всего 1,5 кВт электроэнергии.

### **23. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Большинство из перечисленных выше направлений относилось к использованию низких температур в технических целях.

Область применения криогенного охлаждения в естественно-научных исследованиях достаточно широка. Если обратиться к истории развития криогеники, то можно проследить закономерное опережение исследований, проводимых на определенном низкотемпературном уровне, по сравнению с их техническим применением. Самый яркий пример — открытие сверхпроводимости, сделанное в 1911 г., опередило практическое применение этого явления на десятки лет.

Весьма характерно, что достижения криогенной техники оказывают, в свою очередь, влияние на прогресс

в естественно-научных исследованиях. Появление совершенных рефрижераторов и ожижителей, сверхпроводящих магнитов, криостатов позволяет углублять наши знания о различных явлениях.

Наиболее распространено криогенное охлаждение в исследованиях элементарных частиц. Оно используется прежде всего в ускорителях элементарных заряженных частиц с полями до 6—8 Тл.

Для регистрации следов элементарных частиц широко используются так называемые пузырьковые (обычно водородные) камеры. Пучок частиц, проходя через камеру, оборудованную фото- и киноаппаратурой, при взаимодействии с криогенной жидкостью, находящейся в перегретом (метастабильном) состоянии, оставляет следы своего движения в виде мельчайших пузырьков пара этой жидкости. Пузырьковые камеры в комплексе с крупными ускорителями — это современный инструмент важнейших физических исследований. Широко известны совместные советско-французские эксперименты на французской жидко-водородной пузырьковой камере «Мирабель», на ускорителе заряженных частиц, установленном в Серпухове.

Важную роль при проведении исследований в условиях, имитирующих космическое пространство, играют криогенные вакуумные насосы, обеспечивающие вакуум  $10^{-10}$  мм рт. ст. В крионасосе при низких температурах происходит конденсация газов на поверхности охлаждения, а остаточное давление соответствует упругости пара твердого вещества при температуре охлаждения.

Внутримолекулярную и внутриатомную структуру в физике изучают при охлаждении вещества до температур, близких к абсолютному нулю, где особенно отчетливо проявляются квантовые свойства материи. В этой области ниже 0,3 К создаются уникальные системы, с использованием методов охлаждения, описанных выше (см. гл. 1).

В медицине для восстановления артерий и изучения влияния магнитных полей на жизненные функции организма используются магнитные поля, созданные компактными и удобными для проведения экспериментов сверхпроводящими магнитами. В биологии также используют подобные устройства для изучения поведения растений и животных в магнитном поле.

## 24. ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК

Рассмотрение направлений использования низких температур в различных областях науки и техники показывает, что охлаждение приводит к повышению эффективности и улучшению основных показателей ряда технологических и энергетических процессов, оборудования, а также к созданию принципиально новых устройств, внедрению новых процессов.

В связи с этим становится очевидной необходимость дальнейшего совершенствования и развития техники низких температур для обеспечения потребностей соответствующих отраслей (энергетики и электротехники, металлургии, радиоэлектроники, машиностроения и др.).

При рассмотрении перспектив развития и применения техники низких температур необходимо проанализировать наиболее очевидные тенденции совершенствования существующих и внедрения находящихся в процессе исследования систем и установок.

Как и в любой отрасли народного хозяйства, одна из главных тенденций развития установок, обеспечивающих криогенное и низкотемпературное охлаждение, состоит в повышении их эффективности (увеличений к. п. д., снижении затрат энергии на единицу холодопроизводительности, капитальных затрат и т. д.). Это может быть достигнуто за счет рационализации схем существующих низкотемпературных установок, оптимизации параметров, их определяющих, использования новых рабочих тел, а также усовершенствования показателей элементов, входящих в эти установки (компрессоров, теплообменной аппаратуры, детандеров и т. д.).

Необходимость в повышении к. п. д. этих установок объясняется тем, что они из разряда уникальных, лабораторных переходят в серийные; массовое их производство и эксплуатация связаны со значительной затратой энергии.

Одно из интересных и перспективных направлений совершенствования показателей дроссельных установок, в основе которых положен процесс Линде, — это использование в качестве криоагента многокомпонентных смесей.

Идея замены обычного чистого вещества, используемого в схеме, например азота, смесью объясняется известными недостатками применения чистого вещества

в схемах Линде. Различие в теплоемкостях прямого и обратного потоков приводит к увеличению разности температур на холодном конце регенеративного теплообменника и связанному с ним снижению к. п. д. всей схемы.

При подборе компонентов смеси достигается увеличение изотермического дроссель-эффекта, а также обеспечение оптимального с точки зрения разности температур теплообмена в регенеративном теплообменнике, что связано с изменением теплоемкости смеси в процессе конденсации одного из ее компонентов. В результате к. п. д. установки на смесях может быть повышен примерно в 1,75 раза по сравнению с работой установки на чистом азоте [6]. Кроме того, важным преимуществом схем на смесях является также сокращение пускового периода установок в несколько раз.

Работы по исследованию, созданию и внедрению установок, работающих на смесях в диапазоне температур 75—80 К, проводятся в Советском Союзе [6] и за рубежом. Наряду с этим постоянно ведутся работы по усовершенствованию существующих схем воздухоразделительных установок, водородных и гелиевых рефрижераторов и ожижителей. Перспективны способы, связанные с получением обогащенного воздуха при достаточно низких расходах энергии (используемого, например, в МГД генераторах).

Проводятся работы по исследованию методов обогащения воздуха кислородом с применением мембран (тонких пленок) из поливинилтриметилсилана, основанных на избирательной способности к кислороду мембраны с тонким диффузионным слоем.

В схемах ожижителей, которые принято называть классическими, работы по замене дросселя эжектором, проводимые в Советском Союзе и за рубежом, позволяют практически без усложнения установки добиться повышения ее к. п. д. примерно в 1,5 раза.

Одновременно с работами по совершенствованию схем необходимо повышать эффективность отдельных элементов установок компрессоров, детандеров, теплообменников.

Компрессор — элемент низкотемпературной установки, в котором подводится энергия (чаще всего это единственный элемент с подводом энергии) и рост его к. п. д. приводит к снижению затрат энергии и повышению к. п. д. всей установки.



Совершенствование компрессоров должно быть направлено как на повышение эффективности процесса сжатия в охлаждаемых и неохлаждаемых компрессорах (снижение потерь на трение, уменьшение утечек рабочего тела, создание компрессоров, работающих без загрязнения рабочего тела), так и на разработку более надежного и эффективного привода компрессорных машин. Одним из примеров такого совершенствования является создание компрессора с линейным приводом.

1 Совершенствование детандеров также направлено на повышение их к. п. д. и увеличение надежности. При этом надо учитывать, что с уменьшением их размеров, характерным для малых расходов и высоких давлений газов (в большей степени это относится к турбодетандерам), к. п. д. детандеров снижается. Уменьшение размеров всегда приводит и к увеличению частоты вращения ротора турбодетандера, что усложняет обеспечение высокой надежности. Так, ротор современных гелиевых турбодетандеров имеет частоту вращения около  $(200—300) \cdot 10^3$  об/мин, а в отдельных случаях  $(600—700) \cdot 10^3$  об/мин. Важно отметить, что для воздухоразделительных установок, производящих газообразные продукты, изменение к. п. д. детандера слабо влияет на общий к. п. д. установки; в то же время в установках, производящих ожиженный продукт, увеличение к. п. д. детандера приводит к значительному повышению к. п. д. установки.

Перспективное направление в низкотемпературных установках — применение детандера, работающего в двухфазной области. Замена таким детандером процесса дросселирования приводит, например, к увеличению доли жидкости в гелиевом ожижителе на 25% [1].

Для теплообменной аппаратуры характерна тенденция перехода к серийному изготовлению пластинчато-ребристых теплообменников вместо трубчатых. В последние годы промышленностью осваивается производство так называемых матричных теплообменников [1], имеющих по сравнению с пластинчато-ребристыми значительно большую поверхность теплообмена на единицу массы и объема. Такие аппараты особенно целесообразны для многопоточных теплообменников рефрижераторных и ожижительных установок.

Не менее важной для развития низкотемпературных установок следует считать тенденцию их укрупнения.

Это относится как к газоразделительным установкам, так и к рефрижераторам и ожижителям. Известно, что с ростом холодопроизводительности повышается к. п. д. установок на любом температурном уровне (см. рис. 17), снижаются удельные массовые и объемные показатели установок (отношение массы или объема установки к суммарной холодопроизводительности).

Стремление к увеличению к. п. д. установок, а также возрастающие с каждым годом потребности в продуктах разделения воздуха и сжиженных газах (гелия, водорода) приведут к росту производительностей этих установок. Так, производительность воздухоразделительных установок увеличится примерно до 60—100 тыс. м<sup>3</sup>/ч кислорода. Холодопроизводительность гелиевых и водородных рефрижераторов предполагается довести до нескольких киловатт на гелиевом и водородном уровнях.

Наряду с укрупнением установок должно развиваться и направление, связанное с созданием микрокриогенных установок, предназначенных, как это было показано, в основном для обеспечения работы криоэлектронных приборов.

Из рассмотрения зависимости  $\eta_e = f(Q_0)$ , изображенной на рис. 17, следует, что эта тенденция приводит к неизбежному падению к. п. д. установок малой мощности. Вместе с тем отдельные точки, характеризующие различные установки, имеют разброс по к. п. д., достигающий 10%. Это говорит о больших потенциальных возможностях совершенствования схем установок микрокриогенной техники, что особенно важно для криообеспечения устройств транспортных и автономных систем, где энергетические ресурсы ограничены и высоки требования к массовым и объемным показателям.

Тенденция повышения надежности любой установки всегда существует при оценке перспектив развития. По отношению к криогенным установкам, в особенности применительно к водородному и гелиевому уровням температуры, следует отметить, что современные и будущие энергетические объекты, такие как сверхпроводящие кабель и генератор с криогенным обеспечением, только в том случае могут быть конкурентоспособны в сравнении с обычными устройствами, если они будут наряду с высокой экономичностью иметь высокую надежность, длительный ресурс, измеряемый десятками тысяч часов, высокую степень автоматизации.

Вместе с тем необходимо отметить тенденцию освоения в более широких масштабах температурного уровня в 20—30 К, где применение криорезистивных и сверхпроводящих устройств может дать максимальный экономический эффект. Необходимо подчеркнуть, что для успешного освоения этого уровня криостатирования должны быть найдены материалы — сверхпроводники, обладающие минимальным электрическим сопротивлением в диапазоне 20—30 К.

В этой связи следует отметить также и освоение «неонового» уровня температур, принимая во внимание взрывобезопасность и большую плотность неона по сравнению с водородом.

Одновременно с этим в отдельных отраслях, использующих охлаждение, будет целесообразно переходить на более низкие температуры. Так, в пищевой промышленности для хранения и транспорта продуктов предполагается переход от умеренных температур к температурам азотного уровня. Использование распыленного жидкого азота для замораживания мяса, рыбы, фруктов исключает процессы оттаивания и удаления влаги, позволяет сохранить структуру продукта и замедлить окисление. При этом сохраняются вкусовые качества, запах и товарный вид продукции.

В последние годы в отечественной и зарубежной литературе публикуются исследования, посвященные системам охлаждения, основанным на изменении энтропии в магнитном или электрическом поле.

Развитие этих систем в холодильной и криогенной технике перспективно, так как отвечает одной из общих тенденций современной техники — переходу от использования низших — механических форм движения к высшим — электрическим и магнитным.

Известны три процесса внутреннего охлаждения, основанные на изменении энтропии под воздействием магнитного или электрического поля: размагничивание парамагнитных веществ, намагничивание сверхпроводников и деполяризация диэлектриков [16].

При адиабатном размагничивании рабочего тела, имеющего в исходном состоянии ориентированные в направлении поля магнитные моменты, происходит охлаждение (см. гл. 1).

При деполяризации диэлектриков изменение энтропии происходит в результате ориентации обладающих

дипольным моментом молекул диэлектрика во внешнем электрическом поле.

Система, в которой рабочее тело подвергается термическому и магнитному воздействиям, называется магнитокалорической.

Система, где рабочее тело подвержено термическому воздействию в электрическом поле, называется электрокалорической.

По последним данным в исследованиях термодинамических свойств веществ процессы магнитокалорического и электрокалорического охлаждения могут использоваться во всем диапазоне температур холодильных и криогенных установок. Эти процессы особенно целесообразно использовать для создания рефрижераторов на основе непосредственного применения электроэнергии без термомеханических процессов (или с минимальным их применением). Переход к таким системам позволит во многих случаях повысить надежность систем и увеличить их к. п. д.

Создание и внедрение нового эффективного криогенного оборудования обуславливает прогресс многих отраслей народного хозяйства, и современники последних десятилетий XX в. станут свидетелями уникальных и значительных достижений, получаемых в различных отраслях с применением низких температур.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника низких температур /А. М. Архаров и др.; Под ред. Е. И. Микулина, И. В. Марфениной, А. М. Архарова. — М.: Энергия, 1975. — 511 с.
2. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. — М.: Мир, 1976. — 702 с.
3. Вопросы классификации и терминологии криогенных установок /В. М. Бродянский и др. — Криогенное и кислородное машиностроение. Сер. ХМ-6. — М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1976.
4. Бродянский В. М., Меерзон Ф. И. Производство кислорода. — М.: Металлургия, 1970. — 384 с.
5. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. — М.: Энергия, 1973. — 296 с.
6. Грезин А. К., Зиновьев В. С. Микрокриогенная техника. — М.: Машиностроение, 1977. — 230 с.

7. Грачев А. Б. Расчет работы, затрачиваемой на охлаждение и замораживание криогенных жидкостей вакуумированием парового пространства. — Известия вузов СССР. Энергетика, 1975, № 1, с. 89—93.

8. Охлаждение криогенных жидкостей вакуумированием парового пространства /А. Б. Грачев и др. — ИФЖ, 1975, т. 29, № 6, с. 1007—1012.

9. Каганер М. Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. — М.: Машиностроение, 1966. — 423 с.

10. Холод в машиностроении /А. П. Клименко и др. — М.: Машиностроение, 1977. — 190 с.

11. Клод Ж. Жидкий воздух. — Л.: МХТИ, 1930. — 361 с.

12. Лоунасмаа О. В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. — М.: Мир, 1977. — 356 с.

13. Справочник по физико-техническим основам криогеники /М. П. Малков и др. — М.: Энергия, 1973. — 392 с.

14. Мартынов А. В., Бродянский В. М. Что такое вихревая труба? — М.: Энергия, 1976. — 152 с.

15. Материалы XXV съезда КПСС. — М.: Изд-во политической литературы, 1976, с. 180—186.

16. Мендельсон К. На пути к абсолютному нулю. — М.: Атомиздат, 1971. — 224 с.

17. Микулин Е. И. Криогенная техника — М.: Машиностроение, 1969. — 270 с.

18. Прямое преобразование энергии /Под ред. Н. С. Лидоренко и др. — М.: Мир, 1975. — 362 с.

19. Сверхпроводящие машины и устройства: Пер с англ. /Под ред. Е. Ю. Клименко. — М.: Мир, 1977. — 763 с.

20. Свифт Дж. Путешествия Гулливера. — М.: Московский рабочий, 1958, с. 210.

21. Телеснин Р. В. Молекулярная физика. — М.: Высшая школа, 1973. — 360 с.

22. Криогенная техника /В. Г. Фастовский и др. — М.: Энергия, 1974. — 495 с.

23. Бродянский В. М. Экономика и энергетика комплексного разделения воздуха. — М.: Metallургия, 1966. — 67 с.

24. Двухкомпонентный сублимационный аккумулятор холода Кт-12 /Р. С. Михальченко, В. Д. Вакуленко и др. — Техника низких температур. Сборник научных трудов. — Киев: Наукова думка, 1979. — 140 с.