

А. Б. Фрадков

## ЧТО ТАКОЕ КРИОГЕНИКА



МОСКВА «НАУКА»

1991



ББК  
Ф82  
УДК 621.59

Рецензент

доктор физико-математических наук

В. А. ДАНИЛЬЧЕВ

## Введение

Одной из черт современного научно-технического прогресса является интенсивное развитие криогеники — новой отрасли науки и техники, связанной с получением и использованием так называемых криогенных температур. Слово «криогенный» в переводе с греческого означает «производящий холод». Этим термином в настоящее время принято обозначать все процессы и устройства с рабочей температурой ниже 120 К по абсолютной шкале. Состояние и свойства всех веществ зависят в первую очередь от их температуры. Именно температура определяет, будет ли вещество жидким, твердым или газообразным. Чем ниже температура, тем значительнее ее влияние на физические и химические свойства вещества. Благодаря этому криогенные температуры обладают уникальными возможностями в исследовании свойств веществ и открытии новых физических явлений и фактов, а также позволяют осуществлять принципиально новые технологические процессы и устройства.

Как известно, температура вещества определяется интенсивностью беспорядочного движения составляющих его молекул и атомов. Это движение называется тепловым, и чем быстрее движутся молекулы и атомы внутри тела, тем выше его температура. По мере охлаждения тепловое движение молекул и атомов постепенно замедляется и, наконец, при температуре минус 273,15°С совершенно прекращается. Дальнейшее понижение температуры уже невозможно, так как запас тепловой энергии тела полностью исчерпан. Наилучшую возможную температуру называют абсолютным нулем и принимают за начало отсчета шкалы абсолютных температур. Современную абсолютную шкалу температур предложил в 1848 г. известный английский физик У. Томсон-Кельвин, но понятие об абсолютном нуле впервые было высказано еще в 1744 г. М. В. Ломоносовым в следующей форме: «Величайший холод в теле — абсолютный покой».

В отличие от принятой в повседневном обиходе температурной шкалы Цельсия (обозначается °С),

1604090000-083  
Ф 054(02)-91 65-90 НП

ББК

ISBN 5-02-000769-2 © Издательство «Наука», 1991



имеющей началом отсчета температуру плавления льда, температуру, отсчитываемую от абсолютного нуля, температуры в градусах Цельсия и обозначают буквой К. Численная разница в отсчетах по обычной шкале Цельсия и по абсолютной шкале Кельвина равна  $273,15^\circ\text{C}$ . Таким образом, комнатная температура в  $20^\circ\text{C}$  равна по абсолютной шкале  $293,15\text{ K}$ , а сильный мороз в  $-40^\circ\text{C}$  по абсолютной шкале будет  $233,15\text{ K}$ . На рис. 1 представлена шкала абсолютных температур с обозначением характерных температур некоторых физических объектов и процессов.

Область криогенных температур весьма обширна, и в ней происходит не только резкое изменение физических и химических свойств веществ и переход их из одного агрегатного состояния в другое (газов — в жидкости, жидкостей — в твердое тело), но также появляются новые специфические низкотемпературные свойства вещества и явления, неизвестные при других температурах, как, например, сверхпроводимость, сверхтекучесть и др. [1].

Все это приводит к непрерывному увеличению интереса к криогенным температурам. Экспериментальная физика и энергетика, химия и металлургия, биология и медицина, электроника и радиотехника, авиация и космонавтика, сельское хозяйство и пищевая промышленность во все возрастающих масштабах используют криогенные методы и продукты. Образовалась самостоятельная быстро развивающаяся отрасль промышленности — криогенное машиностроение, обеспечивающее оборудованием производство и хранение криогенных продуктов, новые криогенные технологические процессы и системы.

По физическим методам получения всю область криогенных температур можно разделить на две части: от  $120\text{ K}$  до  $0,3\text{ K}$  и от  $0,3\text{ K}$  до температур, близких к абсолютному нулю.

Практическое охлаждение любых объектов до криогенных температур удобнее всего производить путем их погружения в жидкость, кипящую при нужной температуре. Такими жидкостями могут быть сжиженные газы с низкими температурами кипения — азот, водород, гелий и некоторые другие. Поэтому сжижение таких газов играет первостепенную роль в современной криогенике. Однако испарением криогенных жидкостей можно получать температуры лишь до  $0,3\text{ K}$ . Темпера-

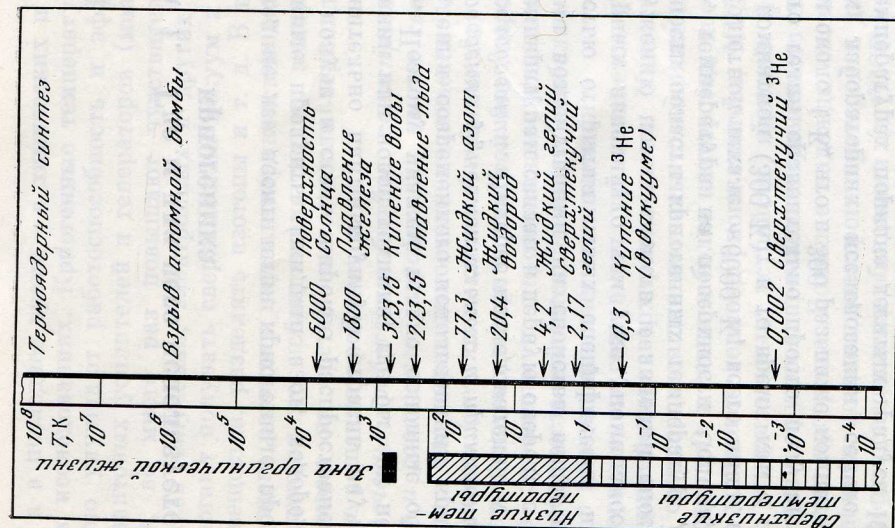


Рис. 1. Шкала абсолютных температур в логарифмическом масштабе

туры ниже  $0,3\text{ K}$ , называемые сверхнизкими, или ультранизкими, могут быть получены только специальными методами (которые будут описаны в гл. 3).

Научными основами криогеники являются физика низких температур и термодинамика, а разработкой и изготовлением криогенной аппаратуры для практических применений занимается новая отрасль промышленности — криогенная техника. Изложению физических основ криогеники и главным направлениям ее современного использования в науке и технике и посвящена предлагаемая читателям книга.



## Глава 1. Где и для чего используется криогеника

В последние два десятилетия криогенные процессы и криогенные продукты (жидкий азот, водород, гелий и др.) получили столь широкое распространение, что затруднительно найти крупную отрасль научных исследований или новой техники, где бы они не применялись. Поэтому укажем только основные области и направления современного использования криогеники.

*Проведение фундаментальных и прикладных научных исследований.* Интерес исследователей к криогенным температурам связан в первую очередь с их сильнейшими воздействиями на свойства веществ и возможностью открытия новых специфически низкотемпературных явлений, о чем уже упоминалось ранее. Обнаружению новых свойств и явлений способствует обширность области криогенных температур. Действительно, температура на поверхности Солнца, равная по абсолютной шкале  $\sim 6000$  К, всего лишь в 20 раз выше комнатной (300 К), в то время как с помощью жидкого гелия сравнительно просто получают температуры около 1 К, что в 300 раз ниже комнатной. А во многих лабораториях исследования сейчас ведутся при температурах порядка десятых градуса Кельвина, т. е. в тысячи раз ниже комнатной. Интересно отметить, что полученные рекордно низкие температуры в 100 млн раз ниже комнатных, в то время как даже температура, получаемая при взрыве атомной бомбы только в 10 тыс. раз выше комнатной.

Открытые при криогенных температурах новые свойства веществ существенно расширяют наши познания фундаментальных законов природы, а изменение физических и химических характеристик веществ посредством криогенных температур позволяет полнее использовать их служебные свойства.

Особенно широко криогенные температуры и криогенные продукты используются для экспериментов в физике твердого тела, электронике, оптике, ядерной

физике, а в последнее время — в химических и биологических исследованиях. Криогенные температуры существенно улучшают работоспособность и эффективность квантовых усилителей и генераторов (лазеров и лазеров), во много раз повышают чувствительность приемников излучения, электронных и других приборов, помогают получать сверхвысокий вакуум и сверхчистые вещества, разделять изотопы и т. д. В прогнозах будущего развития науки американские эксперты ставят криогенные исследования по их значению и перспективам на третье место после термоядерного синтеза и решения проблемы рака.

*Обеспечение работоспособности сверхпроводящих магнитов и различных устройств на основе сверхпроводимости.* Сверхпроводимость называется способностью веществ (металлов, сплавов, химических соединений) пропускать электрический ток без сопротивления. По значению и перспективам использования сверхпроводимости является одним из наиболее значительных и важных физических явлений.

Непрерывно, из года в год, увеличивается практическое применение сверхпроводимости. Уже созданы крупные сверхпроводящие магниты с напряженностью магнитного поля в сотни и более килоэстед, необходимые для установок термоядерного синтеза, МГД-генераторов, ускорительных устройств ядерной физики, решения ряда крупных проблем современного научнотехнического прогресса. Большие надежды связываются с созданием мощных электрогенераторов и двигателей со сверхпроводящими обмотками (в СССР уже испытан такой генератор мощностью 20 тыс. кВт), сверхпроводящих линий электропередач, скоростного транспорта на магнитной подушке, накопителей энергии, сверхбыстродействующих ЭВМ и т. д. Сверхпроводимость позволяет создавать приборы высочайшей чувствительности, не достигаемой другими методами (более подробно о сверхпроводимости мы расскажем ниже, в гл. 4.).

*Ожижение и разделение воздуха с целью получения кислорода, азота, аргона, неона, криптона и ксенона — газов, имеющих важнейшее значение в современной науке и технике.* Получением этих газов из воздуха заняты крупные отрасли химической индустрии во всех промышленно развитых странах, причем объемы производства очень велики и непрерывно воз-



растают. Так, в 1985 г. только в США было произведено кислорода 11 млрд м<sup>3</sup>, азота 20 млрд м<sup>3</sup>. Современные воздуходелительные установки достигли громадной производительности. Крупнейшая в нашей стране воздуходелательная установка КГ-70 перерабатывает в час 350 тыс. м<sup>3</sup> воздуха, обеспечивая одновременное производство 66 тыс. м<sup>3</sup>/ч газообразного кислорода, 30 тыс. м<sup>3</sup>/ч газообразного азота и 5000 кг/ч жидкого кислорода или жидкого азота [2]. Процессы ожижения и разделения воздуха требуют криогенных температур 70–90 К.

*Ожижение азота, гелия, кислорода, природного газа с целью их хранения и транспортировки к местам потребления*, где они обычно используются в газобразном виде. Выгодность транспортировки газа в жидком виде связана с тем, что при сжижении объем газа уменьшается в 700–1000 раз, что дает большую экономию в объемах и весах транспортных средств.

В особо крупных масштабах ведется транспортировка сжиженного природного газа, играющего все большую роль в энергетическом балансе развитых стран. Основные месторождения природного газа расположены в Алжире, Индонезии, Ливии, откуда он экспортируется в Японию, США, страны Западной Европы. Для транспортировки сжиженных газов используются автомобильные и железнодорожные цистерны, а для морских перевозок сжиженного природного газа — специальные океанские танкеры-метановозы. Флот таких танкеров постоянно растет, а вместимость наиболее крупных судов достигает 120 тыс. кубических метров газа. Транспортировка больших количеств сжиженных газов производится также по криогенным трубопроводам.

*Ожижение водорода* с целью использования его как ракетного топлива, а также для заполнения жидководородных камер при ядерных исследованиях на ускорителях.

Американская ракетно-космическая система «Сатурн V» требует 90 т жидкого водорода. Мощнейший в мире советский ракетоноситель «Энергия» также использует двигатель с криогенными жидкостями.

Потребности ракетной техники в жидком водороде столь значительны, что производительность водородо-ожижительных установок достигает громадной величины: 50–60 т в сутки.

*Разделение углеводородных газовых смесей*, природных и промышленных, с целью извлечения из них водорода, гелия, метана и других газов, являющихся сырьем для химической промышленности. Потребность в этих газах непрерывно растет и потому непрерывно увеличиваются количество и мощность соответствующих установок. Криогенные методы в процессах разделения газовых смесей занимают одно из главных мест.

*Разделение газовых изотопов*. Путем сжижения и последующей ректификации можно эффективно разделять изотопы водорода, кислорода, азота, аргона и других газов. Особо важное значение имеет извлечение таким путем из жидкого водорода дейтерия для получения тяжелой воды в промышленных масштабах. Тяжелая вода в больших количествах применяется для замедления быстрых нейтронов, а также в качестве теплоносителей в реакторах атомных электростанций. Тяжелую воду можно получать и другими методами, но криогенный способ является самым выгодным.

*Очистка газов*. Получение чистых газов является одной из важнейших задач современной техники. Криогенные способы очистки — вымораживание и адсорбция при низких температурах относятся к наиболее эффективным и все чаще вытесняют другие способы очистки.

*Получение высокого вакуума*. Использование криогенных адсорбционных и конденсационных насосов позволяет получить наиболее высокий и чистый (без масляный) вакуум. Для охлаждения адсорбционных вакуум-насосов чаще всего применяется жидкий азот, конденсационных — жидкий гелий.

*Имитация космоса*. При разработке космической техники широко применяются так называемые криотермовакuumные установки (КТВУ), позволяющие моделировать работу различных изделий в условиях космического полета. Охлаждаемые криогенными жидкостями вакуум-насосы, экраны, системы теплоотвода и т. д. являются обязательными частями этих установок.

*Долговременное хранение и транспорт мяса, рыбы и других продуктов агропромышленного комплекса*. Использование жидкого азота для сохранения потребительских качеств продуктов дает лучшие результаты, чем фреоновое или аммиачное охлаждение.



В биологии и медицине все шире используется *способность криогенных температур замедлять химические и биологические реакции*. Так, жидкий азот применяется для длительного хранения крови, отдельных органов, спермы элитных животных. В медицинской практике для операций с успехом используются инструменты с криогенным охлаждением, дающие возможность локального замораживания удаляемых участков органов. По утверждению медиков, криохирurgia имеет очень хорошие перспективы.

Каждый год появляются все новые области применения криогенных температур или расширяются уже известные. В ряде случаев использование криогенных температур приобрело такой размах, что образовались самостоятельные научно-технические специализации, как, например, криогенная электроника, криобиология, космическая криогеника и т. д. Нет сомнения, что использование криогеники в науке, промышленности, сельском хозяйстве, медицине будет продолжать расширяться.

## Глава 2. Немного истории

Прошло немногим более 100 лет с того времени, когда ученые научились получать низкие температуры, которые мы сейчас относим к криогенным. По рекомендации Международного института холода (его членом является и Советский Союз) датой рождения криогеники считается 1877 г., в конце которого француз Л. Кальете и швейцарец Р. Пикте сжижили кислород, достигнув температуры 90 К.

Однако работы по получению низких температур начались гораздо раньше, причем основной целью ученых было использование их для сжижения газов. Наблюдая, как обычные жидкости при нагревании превращаются в пары, а под влиянием охлаждения возвращаются в исходное жидкое состояние, исследователи задались вопросом: не являются ли и газы — естественные или полученные химическим путем — парами жидкостей, кипящих при очень низких температурах. Для проверки этого предположения необходимо было найти способы получения температур, достаточно низких для перевода газа в жидкое состояние. О важности задачи свидетельствует тот факт, что проблемой

сжижения газов занимались самые выдающиеся ученые XVIII и XIX вв.: Ломоносов, Лавуазье, Фарадей, Менделеев, Джоуль, Томсон и др.

Но первое описание процесса получения жидкого воздуха появилось не в научном труде, а в художественном произведении. И сделал это Свифт в своей знаменитой книге «Путешествия Гулливера». В части 3, главе 5 — описание академии в Логодо — имеются такие строки: «Под началом великого ученого находилось 50 рабочих. Одни стучали воздух, делая его осязаемым, извлекая из него селитру\* и давая испариться текучим и водянистым частицам...» Удивительно и интересно не то, что Свифт, сатирически высмеивая никчемные занятия ученых, отнес к ним и ожигание газов, а то, что он с опережением почти в два века (первое издание «Путешествия Гулливера» вышло в свет в 1726 г.), сам того не сознавая, дал полную картину современного процесса ожигания и разделения воздуха. Вообще, в области ожигания газов идеи и теоретические выводы значительно опережали их практические осуществления.

То, что три состояния вещества — твердое, жидкое и газообразное — представляют собой последовательный ряд, зависящий от температуры, утверждали еще в середине XVIII в. Ломоносов и Лавуазье. Первое же сжижение газа было сделано почти в конце века — в 1792 г.: нидерландский физик М. Ван-Марум сжижил аммиак. Только спустя 40 лет, в 1832 г., М. Фарадей, одному из величайших ученых XIX в., удалось сжигить хлор, а затем в 40-х годах — этилен и другие газы. Метод, который применяли Фарадей и другие ученые для сжижения газов, заключался в комбинации сжатия с умеренным охлаждением холодильными смесями. Однако Фарадею и его последователям, несмотря на многолетние усилия, не удалось перевести в жидкое состояние кислород, азот, водород, метан, окись углерода и окись азота, хотя они применяли довольно глубокое по тем временам предварительное охлаждение, до  $-110^{\circ}\text{C}$ , и громадные, до нескольких тысяч атмосфер, давления. В научных публикациях тех времен эти шесть газов даже получили название «постоянных» (гелий и редкие газы в то время еще не были открыты).

\* Во времена Свифта состав воздуха еще не был известен.



В середине XIX столетия знаменитыми английскими учеными Д. Джоулем и Д. Томсоном было открыто явление понижения температуры газа при его расширении пропусканием через суженное отверстие. Это явление, получившее название эффекта Джоуля—Томсона, сыграло важную роль в технике сжижения газов и широко используется до сих пор.

Причины же неудач Фарадея и других ученых в сжижении так называемых постоянных газов стали понятны благодаря работам Менделеева и Эндрюса. В 1861—1863 гг. Менделеев и Эндрюс независимо друг от друга установили, что каждый газ имеет свою определенную температуру, выше которой он никаким способом не может быть переведен в жидкое состояние. Эта температура теперь называется критической (Менделеев называл ее абсолютной температурой кипения). Например, для кислорода критическая температура перехода в жидкое состояние равна минус 119° С (154 К), для азота — минус 147° С (126 К) и т. д. Так как Фарадей и другие ученые охладжали «постоянные» газы только до минус 140° С, т. е. выше их критической температуры, то, естественно, они не могли их сжигить, даже применяя очень высокие давления. После открытия критической температуры сжижение «постоянных» газов пошло довольно быстро. В конце 1877 г. Кальете и Пикте независимо друг от друга путем однократного адиабатического расширения сжижили в очень небольшом количестве кислород, достигнув на короткое время температуры ~90 К. Пикте и Кальете в своих опытах получали только мельчайшие капельки кислорода, которые быстро испарялись. Собрать же заметное количество жидкого кислорода, а также азота и окиси углерода впервые удалось в 1883 г. польским ученым С. Вроблевскому и Э. Ольшевскому [3].

Так как историю криогеники принято начинать с первого сжижения кислорода, интересны некоторые неординарные подробности этого события. Соавторство в открытиях обычно связано с совместной работой. Кальете и Пикте вели исследования в разных местах: один в Париже, другой в Женеве, и то, что оба считаются первыми, кажется странным. Неужели они сделали это в один и тот же день и час? В действительности первым получил капельки жидкого кислорода Кальете, и случилось это 2 декабря 1877 г.,

о чем он тотчас же уведомил письмом сотрудника Французской академии наук Девиля. Однако Кальете попросил отложить оглашение своих результатов, так как в то время он баллотировался в члены-корреспонденты академии и не хотел оказывать влияния на исход голосования столь сенсационным сообщением. Такая чрезвычайная скромность делает ему честь, но обобщая она ему довольно дорого: потерял единоличного приоритета. Дело в том, что во Франции существует правило, по которому вопрос о научном приоритете определяется датой представления в Академию наук. 17 декабря Кальете был избран членом-корреспондентом, а 24 декабря секретарь академии Дюма должен был доложить о его работе по сжижению кислорода. Но за два дня до этого, 22 декабря, была получена телеграмма из Женевы от Пикте, что он сжижил кислород. Сообщение Кальете и телеграмма Пикте были оглашены 24 декабря одновременно, и таким образом они стали соавторами. Годом позже они же сжижили азот и окись углерода.

Жидкий водород был впервые получен в 1898 г. знаменитым английским физиком Дж. Дьюаром. Он же предложил использовать для хранения сжиженных газов двухстенные сосуды с высоковакуумной теплоизоляцией, известные под названием «сосуды Дьюара» и широко применяемые до сих пор не только в криогенике, но и как бытовые термосы для хранения горячего чая, кофе и других жидкостей.

Наконец, в 1908 г. известному нидерландскому физiku Г. Камерлинг-Оннесу удалось сжигить последний из ранее неподдававшихся сжижению газов — гелий, имеющий критическую температуру лишь на 5,25° выше абсолютного нуля и кипящей под атмосферным давлением при 4,2 К. Для сжижения гелия Камерлинг-Оннес использовал эффект Джоуля—Томсона: путем дросселирования сжатого газообразного гелия, предварительно охлажденного жидким водородом, кипящим под вакуумом. За сжижение гелия Камерлинг-Оннес был удостоен в 1913 г. Нобелевской премии по физике.

Дату первого охлаждения гелия можно считать началом современного этапа физики низких температур. В последующие 25 лет после первого охлаждения гелия получение температур ниже 4,2 К производилось путем его вакуумирования. Так, в 1919 г. Камерлинг-



Т а б л и ц а 1. Хронология получения наиболее низких температур в криогенной области

| Год получения | Температура                               | Кем получена (метод)                                                                                                                                                              |
|---------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1877          | 90 К                                      | Л. КАЛЬЕТЕ и Р. ПИКТЕ (адиабатное расширение сжатого кислорода)                                                                                                                   |
| 1883-1885     | 77 К                                      | Э. ОЛЬШЕВСКИЙ и С. ВРОБЛЕВСКИЙ (однократное адиабатное расширение сжатого газа, предварительное охлаждение жидким этиленом под вакуумом)                                          |
| 1888          | 55 К                                      | Э. ОЛЬШЕВСКИЙ и С. ВРОБЛЕВСКИЙ (вакуумирование жидкого азота и кислорода)                                                                                                         |
| 1898          | 20 К                                      | ДЖ. ДЬЮАР (сжижение водорода с использованием эффекта Джоуля — Томсона)                                                                                                           |
| 1900          | 14 К                                      | ДЖ. ДЬЮАР (вакуумирование жидкого водорода)                                                                                                                                       |
| 1908          | 4,2 К                                     | Г. КАМЕРЛИНГ-ОННЕС (сжижение гелия с использованием эффекта Джоуля — Томсона)                                                                                                     |
| 1919          | 1,0 К                                     | Г. КАМЕРЛИНГ-ОННЕС (вакуумирование жидкого гелия)                                                                                                                                 |
| 1932          | 0,71 К                                    | В. КИЗОМ (вакуумирование жидкого гелия)                                                                                                                                           |
| 1933          | 0,27 К                                    | У. ДЖИОК и Д. МАК-ДУГАЛ (адиабатическое размагничивание парамагнитных солей)                                                                                                      |
| 1956          | 2·10 <sup>-5</sup> К                      | Н. КЮРТИ, Ф. СИМОН, Ф. РОБИН-ЗОН, Д. СПОР (адиабатное размагничивание ядер меди)                                                                                                  |
| 1963          | 1,2·10 <sup>-6</sup> К                    | Н. КЮРТИ с сотрудниками (адиабатическое размагничивание ядер меди)                                                                                                                |
| 1965          | 0,025 К<br>(в настоящее время до 0,002 К) | Б. НЕГАНОВ, Н. БОРИСОВ, М. ЛИБЕРТ (растворение <sup>3</sup> He в жидком <sup>4</sup> He. Спосо- б предложён в 1962 г. Х. ЛОНДОН, Б. МЕНДОЗОЙ и Г. КЛАР- КОМ)                      |
| 1965          | 0,018 К<br>(в настоящее время до 0,001 К) | Адиабатное сжатие смеси твёрдого и жидкого <sup>3</sup> He при T=0,32 К. Метод предложен в 1950 г. И. ПОМЕРАН- ЧУКОМ. Стационарно устойчивые температуры получены Ю. АНУФ- РИЕВЫМ |

предварительное охлаждение сжатого воздуха жидким аммиаком и вырабатывала 8 л жидкого воздуха в час — по тем временам весьма значительное количество. В 1903 г. Ж. Клод создал во Франции первую воз- духоожижительную установку, в которой холод полу- чался за счет расширения сжатого газа в специальной

Оннес откачал пары над жидким гелием до давления 0,19 мм рт. ст., что соответствует температуре 1,0 К. В 1932 г. нидерландский физик В. Кизом при помощи батарей мощных масляных и диффузионных насосов довел температуру жидкого гелия до 0,71 К.

В 1926 г. Ф. Симон в Германии предложил десорб- ционный метод охлаждения, основанный на использо- вании эффекта понижения температуры при десорб- ции газа, предварительно адсорбированного каким- либо адсорбентом, например активированным углем. Если адсорбцию вести при температуре жидкого гелия (4,2-4,5 К), то при десорбции путем вакуумирования может быть получена температура ~1,6 К.

В 1933 г. американские ученые У. Джоук и Д. Мак- Дугалл ввели в практику получения сверхнизких тем- ператур новый метод — адиабатическое размагничива- ние парамагнитных солей. Размагничиванием сульфата гадолиния они получили температуру 0,27 К, го- раздо более низкую, чем можно достигнуть откачкой паров жидкого гелия. К концу 40-х годов методом размагничивания была достигнута температура 0,001 К.

С середины 60-х годов магнитный метод получения сверхнизких температур был вытеснен более удобным и эффективным методом растворения гелия-3 в сверх- текучем гелии-4. Рефрижераторы, основанные на этом принципе, вошли в практику с середины 60-х годов и стали в настоящее время незаменимыми для исследо- ваний в области температур от 0,25 до 0,01 К. Рекорд- но низкая на сегодняшний день температура в 1,2·10<sup>-6</sup> К была впервые получена в 1963 г. английским физиком Н. Кюрти с сотрудниками методом адиабати- ческого размагничивания ядер меди.

Хронология получения наиболее низких криоген- ных температур приведена в табл. 1.

Промышленное производство криогенных установок началось с изготовления в Германии и Франции в са- мом конце XIX столетия воздухоожижительных и воздухоожижительных установок. В 1900 г., на рубеже XIX и XX вв., на Всемирной выставке в Париже де- монстрировалась вызвавшая всеобщий интерес одна из первых промышленных установок для ожижения воз- духа, разработанная К. Линде — одним из крупнейших немецких криогеников того времени. Установка рабо- тала по холодильному циклу с дросселированием (с тех пор его называют «циклом Линде»), имела



машине — детандере\*. Разработанная Клодом схема охлаждения носит его имя («цикл Клода») и широко используется во многих видах современных криогенных установок.

В последующие годы начинает быстро расти число и мощность установок, охлаждающих воздух по схемам Линде и Клода и разделяющих его на кислород и азот. К началу 20-х годов производительность отдельных агрегатов по кислороду достигла 500 м<sup>3</sup>/ч.

Одновременно совершенствуются способы очистки воздуха от паров воды и углекислоты. Распространенные вначале химические методы очистки сменяются физическими — вымораживанием и адсорбцией. Существенным достижением явилось применение с конца 20-х годов в воздухохоразделительных установках вместо трубчатых теплообменников регенераторов, в которых одновременно с эффективной рекуперацией холода шла осушка и очистка воздуха.

С 1932 г. в крупных установках фирмы «Линде» (Германия) начинают применяться вместо поршневых детандеров турбодетандеры активного типа с коэффициентом полезного действия до 65%. Новый шаг в этом направлении был сделан в 1937—1939 гг., когда академиком П. Л. Капицей был разработан высокоэффективный радиальный турбодетандер активного типа с КПД до 0,82%. Это позволило Капице создать установку жидкого и газообразного кислорода с холодильным циклом только низкого давления. Схема низкого давления П. Л. Капицы лежит в основе многих современных воздухохоразделительных установок, достигших громадной производительности — в одном агрегате перерабатывается до нескольких сот тысяч кубометров воздуха в час.

Что касается окислителей водорода и гелия, то выпуск их промышленными фирмами начался после второй мировой войны. До 1923 г. окисление гелия велось только в лаборатории Камерлинг-Оннеса в Лейдене. В последующие годы окислители водорода и гелия лабораторного типа стали самостоятельно строиться различными научными учреждениями, так что к началу 40-х годов их насчитывалось в мире около двух десятков. Существенным достижением в технике окис-

\* От французского «detendre» — ослаблять, снижать давление, разряжать.

жения гелия явилось создание в 1934 г. П. Л. Капицей первого гелиевого окислителя с детандером, что позволило отказаться от использования для предварительного охлаждения взрывоопасного жидкого водорода. Выпускаемые в настоящее время промышленными фирмами серийные гелиевые окислители имеют обычно производительность от ~25 до ~120 л/ч; однако в отдельных случаях, например для охлаждения крупных сверхпроводящих магнитов, изготавливаются установки гораздо более мощные: в США (штат Техас) много лет работает установка, дающая ~800 л/ч жидкого гелия.

Изготовление водородных окислителей для научных исследований было начато промышленностью в 50-х годах. Производительность их колеблется в широких пределах — от 5 до 300 л/ч, и работают они, как правило, на холодильном цикле с дроселированием при предварительном охлаждении сжатого водорода жидким азотом.

В 1957—1958 гг. советскими специалистами впервые в мире был осуществлен в промышленном масштабе процесс извлечения из жидкого водорода дейтерия с целью получения тяжелой воды для ядерных реакторов.

Использование жидкого водорода в качестве ракетного топлива привело к созданию крупных промышленных установок для его сжижения. Так, в США с 60-х годов работают заводы, производящие до 60 т жидкого водорода в сутки — от 30 тыс. л/ч! При крупнотоннажном производстве жидкого водорода используются холодильные циклы с несколькими детандерами, причем жидкий водород для его длительного хранения выдается в пара-форме.

Водороду придается особое значение в энергетике будущего как наиболее чистому экологическому топливу — при его сжигании образуется только водяной пар. Водородная энергетика потребует значительного увеличения производства газообразного водорода, что приведет и к возрастанию масштабов его сжижения для хранения и транспортировки.

Есть все основания считать, что мировое производство сжиженных газов, а следовательно, и количество соответствующих криогенных установок, будет непрерывно расти.



### Тепло, холод и другие понятия

С ощущением тепла или холода мы знакомимся посредством своих чувств с момента рождения. С помощью таких прилагательных, как «теплый», «горячий», «холодный» и т. д., мы качественно оцениваем присущее всем предметам особое свойство, называемое температурой. Чем горячее нам кажется предмет, тем выше его температура. Температура является тем свойством, которое определяет, находится ли данное тело, или система, в тепловом равновесии с другими окружающими его телами или системами. Когда два тела находятся в тепловом равновесии, это означает, что их температуры одинаковы. Если же два соприкасающихся тела имеют разную температуру, то от более горячего тела к менее горячему пойдет поток энергии. Этот поток энергии и называется теплом. Таким образом, тепло представляет собой энергию, передаваемую только при наличии разности температур.

Особенность теплоты как формы энергии состоит в том, что она не может быть полностью превращена в работу или другие виды энергии. Механическая, электрическая, химическая и другие виды энергии могут полностью переходить друг в друга, а также в тепло или работу. Для перехода же тепловой энергии обязательно необходима разница температур. Для поддержания этой разницы температур часть из предназначенного для перехода тепла, забираемого у источника с более высокой температурой, должна быть передана приемнику с более низкой температурой, и эта часть не может быть преобразована в другие виды энергии. Тепло могло бы полностью быть переведено в другие виды энергии, если бы температура указанного приемника могла быть равна абсолютному нулю, что невозможно. Невозможность полного перевода тепла в другие виды энергии не противоречит всеобщему закону сохранения энергии, являющегося первым началом термодинамики и утверждающего, что для любой изолированной системы общее количество заключенной в ней энергии сохраняется неизменным.

Тепловое состояние тела, помимо температуры, ха-

актеризуется еще особой величиной, называемой энтропией и обычно обозначаемой буквой  $S$ . Существование энтропии как функции состояния вытекает из второго начала термодинамики, определяющего направления тепловых процессов. Согласно второму началу термодинамики, самопроизвольно тепло переходит только от тела более горячего к телу менее горячему, и энтропия при этом возрастает. Обратный процесс — переход тепла от тела менее нагретого к телу более нагретому может быть осуществлен только искусственным путем с затратой работы. Абсолютное численное значение энтропии определяется из третьего начала термодинамики, согласно которому значение энтропии при абсолютном нуле обращается тоже в нуль.

Фундаментальное свойство энтропии состоит в том, что ее изменение ( $dS$ ) в элементарно малом обратимом процессе равно количеству переданного тепла ( $dQ$ ), деленному на абсолютную температуру  $T$ , т. е.

$$dS = dQ/T.$$

Процессы, протекающие при постоянной энтропии ( $dS=0$ ), называются адиабатическими, или изэнтропическими. Все реальные процессы являются необратимыми, и в них энтропия всегда возрастает (т. е.  $dS>0$ ). Величина возрастания энтропии может служить мерой необратимости процесса и потерь в нем.

С молекулярной точки зрения (а все вещества состоят из молекул) энтропия характеризует степень молекулярного беспорядка в системе. По мере перехода к равновесному с окружающей средой состоянию молекулярный беспорядок в системе увеличивается, а ее энтропия растет. Состояние равновесия есть состояние с максимальной энтропией. В природе вообще существует тенденция перехода в состояние с большим беспорядком, т. е. господствует закон возрастания энтропии, распространяющийся на все процессы. Так, сжатый газ стремится расширяться, скалы под действием ветра и дождя разрушаются, машины и орудия изнашиваются и, что хуже всего, человек со временем стареет и теряет работоспособность\*.

Из всего изложенного следует, что получение и поддержание температур ниже окружающей среды (ох-

\* Более подробно об энтропии и ее связи с окружающей средой можно прочесть в научно-популярной брошюре К. К. Ребане [4].



лаждение) в принципе труднее, чем получение температур выше окружающей среды (нагревание). Высокие температуры могут возникать в природе спонтанно и встречаются очень часто, в то время как температуры ниже окружающей среды в природе, как правило, не встречаются. Еще средневековый философ Бэкон заметил, что «природа столь скудно доставляет нам холод».

Следует отметить, что термины «тепло» и «холод» неразрывно связаны друг с другом, физическая сущность их одинакова, и поэтому кажется, что от термина «холод» можно отказаться. Однако практически это было бы неудобно, ибо термин «холод» позволяет подчеркнуть отличие отвода тепла при температурах ниже температуры окружающей среды ( $T < T_{o.c.}$ ) от отвода тепла при  $T > T_{o.c.}$ . Процесс отвода тепла от объекта, имеющего температуру выше температуры окружающей среды, может идти самопроизвольно, не только не требует затраты работы, но может вестись даже с получением работы. Отвод же тепла при температурах ниже температуры окружающей среды, к которому относится понятие «холод», обязательно требует затраты работы.

Применение термина «холод» и производных от него — «холодопроизводительность», «потери холода» — удобно также при расчетах низкотемпературных систем.

С точки зрения термодинамики процесс охлаждения заключается в переносе тепла с желаемого низкого температурного уровня  $T_2$  на более высокий  $T_1$ . Чаще всего более высоким температурным уровнем, на который переносится тепло, является температура окружающей среды  $T_{o.c.}$  ( $T_1 = T_{o.c.}$ ). Такой перенос может быть осуществлен только при затрате энергии. Эта затрата энергии будет минимальной в идеальных условиях так называемого обратного цикла Карно и определяется по следующей формуле:

$$L_{\text{мин}} = q \left( \frac{T_1 - T_2}{T_2} \right),$$

где  $L_{\text{мин}}$  — минимальная затрата работы на перенос тепла  $q$  с низкого температурного уровня  $T_2$  на более высокий  $T_1$ .

Из закона сохранения энергии следует, что на тем-

пературном уровне  $T_1$  должно быть отведено тепло  $Q = q + L_{\text{мин}}$ .

Из приведенного выражения для  $L_{\text{мин}}$  видно, что чем ниже температура, которую мы желаем получить, тем больше требуемая для этого энергия. Если принять температуру окружающей среды  $T_{o.c.} = 300 \text{ K}$  ( $27^\circ \text{C}$ ), то для переноса на этот уровень 1 Дж тепла ( $q = 1 \text{ Дж}$ ) с азотного уровня ( $T_2 = 80 \text{ K}$ ) требуется минимальная энергия в 2,75 Дж, с водородного уровня ( $T_2 = 20 \text{ K}$ ) — 14 Дж, а с гелиевого уровня ( $T_2 = 4 \text{ K}$ ) — 74 Дж. Действительные же затраты энергии превышают идеальные в 5–10 раз и более в зависимости от значения низшего температурного уровня.

Что касается понятия «охлаждение», то по своей природе оно может быть двух видов: *внешнее охлаждение*, когда понижение температуры связано с отводом тепла от тела в окружающую его среду, и *внутреннее охлаждение*, когда понижение температуры осуществляется без отвода тепла во внешнюю среду.

С внешним охлаждением мы сталкиваемся повсеместно и очень часто. Так, охлаждение продуктов в наших холодильниках производится путем внешнего охлаждения. Зимой мы одеваемся теплее, чтобы предохранить себя от внешнего охлаждения. Для проведения внешнего охлаждения ниже температуры окружающей нас природной среды необходима искусственная система (например, тот же бытовой холодильник), в которой создаются температуры более низкие, чем у охлаждаемого объекта. Криогенные температуры могут быть достигнуты только внутренним охлаждением, играющим особую роль в криогенике.

Внутреннее охлаждение основывается на зависимости энтропии тела от так называемых интенсивных термодинамических параметров, характеризующих состояние тела. К таким интенсивным термодинамическим параметрам относится давление газа, напряженность магнитного и электрического полей, химический потенциал и др.

Процесс внутреннего охлаждения совершается в две стадии: сначала интенсивный термодинамический параметр тела изменяется изотермически в направлении, соответствующем уменьшению энтропии тела (например, сжатием газа, намагничиванием тела и т. д.), затем при постоянной энтропии изменяют выбранный интенсивный параметр в противоположном



направлении (например, расширение газа, размагничивание). На первой стадии над системой совершается работа с отводом тепла путем внешнего охлаждения. На второй стадии система сама совершает работу за счет своей внутренней энергии. Энтропия ее при этом остается постоянной, а температура понижается.

Для получения криогенных температур в качестве изменяемого термодинамического параметра чаще всего используют давление, а в области ультранизких температур — напряженность магнитного поля и растворение изотопов гелия. Рабочими стадиями процесса охлаждения при использовании давления являются охлаждение при использовании давления, сжатие и расширение газа, при использовании напряженности магнитного поля — намагничивание и размагничивание, при растворении — изменение концентрации раствора  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  с выделением теплоты растворения.

Хотя имеются и другие термодинамические характеристики, изменение которых приводит к понижению температуры, в современной криогенике наибольшее распространение получило использование трех указанных термодинамических параметров. Получение криогенных температур на их основе более подробно рассматривается ниже.

### Получение криогенных температур расширением сжатого газа

Расширение предвзвешенно сжатого газа является в настоящее время основным и наиболее широко используемым методом получения криогенных температур и жидких криогенных продуктов. Метод пригоден для получения любых криогенных температур, кроме ультранизких (ниже 0,3 К).

Согласно общим законам термодинамики, для понижения своей температуры расширяющийся газ должен совершать какую-либо работу за счет своей внутренней энергии. Вид совершенной работы и эффективность получаемого охлаждения зависят от примененного способа расширения. Сжатый газ может быть расширен тремя способами: дросселированием, детандированием и выпуском из постоянного объема (выхлоп).

*Дросселированием* называется снижение давления потока газа или жидкости при пропускании его через суженное отверстие (вентиль, кран и т. п.) в условиях

отсутствия теплообмена с окружающей средой. Проходя через дроссельное отверстие, все реальные газы изменяют свою температуру — охлаждаются или нагреваются. Изменение температуры газа при дросселировании (эффект Джоуля—Томсона) является результатом двух видов работ, совершаемых газом: против внутренних сил притяжения молекул и по изменению объемной энергии потока газа, равной произведению  $P \cdot V$  ( $P$  — давление,  $V$  — удельный объем). Так как при расширении газа расстояние между молекулами увеличивается, то работа на преодоление межмолекулярных сил всегда дает охлаждение, изменение же объемной энергии в процессе дросселирования может давать как охлаждение, так и нагревание. Если объемная энергия газа до расширения больше, чем объемная энергия после расширения ( $P_1 V_1 > P_2 V_2$ ), то имеет место нагревание, если меньше ( $P_1 V_1 < P_2 V_2$ ) — охлаждение.

Весьма часто, особенно при повышенных температурах, нагрев от изменения объемной энергии превышает охлаждение от работы против межмолекулярных сил и газ в результате дросселирования не охлаждается, а нагревается (в этих случаях говорят, что эффект Джоуля—Томсона отрицателен). Так как межмолекулярные силы растут с понижением температуры, то для каждого газа имеется своя температура, при которой нагревание от изменения объемной энергии при дросселировании равно охлаждению от работы против межмолекулярных сил. Эта температура носит название температуры инверсии Джоуля—Томсона и обозначается  $T_{\text{инв}}$ . Так, например, для гелия  $T_{\text{инв}} = 40$  К, для водорода 200 К, для азота 550 К и т. д.

В процессе дросселирования газ будет охлаждаться только в том случае, когда его температура перед дросселированием будет ниже инверсионной. Если температура сжатого газа выше инверсионной, то при дросселировании он будет нагреваться. Этим объясняется тот факт, что водород и гелий при дросселировании с комнатной температуры не охлаждаются, а нагреваются.

Таким образом, все газы, имеющие температуру инверсии Джоуля—Томсона выше температуры выше комнатной (например, азот, кислород, метан и др.) могут быть охлаждены простым дросселированием. Если же газ имеет  $T_{\text{инв}}$  ниже комнатной (например, водород, гелий, неон), то для охлаждения его методом дросселирования



требуется предварительное охлаждение посторонним хладагентом до температуры заметно ниже  $T_{\text{пл}}$ .

Изменение температуры при дроселировании имеет место только для реальных газов, так как в идеальном газе силы межмолекулярного сцепления отсутствуют, а объемная энергия при расширении не меняется (произведение  $PV$  — постоянно). Полезной внешней работы при дроселировании не совершается, сам процесс является необратимым и, следовательно, сопровождается возрастанием энтропии.

*Детандированием* называется расширение газа в специальной машине — детандере, в которой газ совершает внешнюю, отводимую на сторону работу, например, двигая поршень в цилиндре (в поршневых детандерах) или вращая колесо турбины (в турбодетандерах). В идеальном детандере расширение газа должно протекать при постоянной энтропии, и потому этот способ часто называют обратимым изотропическим расширением с совершением внешней работы. В реальном детандере из-за неизбежных потерь тепла (на трение, через теплоизоляцию и т. д.) процесс расширения идет с возрастанием энтропии. Степень отклонения действительного процесса от адиабатического учитывается так называемым адиабатическим коэффициентом полезного действия детандера, который равен отношению действительно произведенного количества холода к теоретически возможному. Значения адиабатического КПД современных детандеров лежат в пределах 70–85%.

Детандирование является наиболее эффективным методом охлаждения и потому наиболее часто используется в современных криогенных установках. При высоких и средних давлениях сжатого газа применяются детандеры поршневого типа, при средних и низких давлениях — турбодетандеры.

Наконец, третий способ расширения сжатого газа состоит в простом *выпуске* его из сосуда постоянного объема (*выпуск*). Охлаждение при этом имеет место за счет совершаемой работы выталкивания, т. е. преодоления расширяющимся газом сил внешнего противодавления. В теоретических курсах этот способ называют необратимым адиабатным расширением с совершением работы над газом.

Совершаемая при выхлопе работа полезно не используется, и эффективность этого способа расширения

ниже, чем при детандировании и дроселировании. Однако в ряде случаев использование охлаждающего эффекта выхлопа из-за его простоты может дать определенные преимущества. Например, он применяется в так называемом экспансионном методе Симона для периодического получения небольших количеств жидкого гелия. По методу Симона (впервые был осуществлен в 1932 г.) сосуд, содержащий гелий под высоким давлением (10–12 МПа), охлаждается твердым водородом до 10–14 К, после чего теплоизолируется и газ выпускается из сосуда через вентиль. В результате оставшийся в сосуде гелий (~40–60%) сжимается. Для получения таким способом жидкого водорода сосуд с сжатым газообразным водородом нужно охладить до 50–60 К. На методе выхлопа основано и действие микрокриогенной газовой машины, разработанной американскими учеными В. Гифордом и Д. Мак-Магоном [1].

Описанные три способа расширения сжатого газа позволяют сжимать любой газ, включая и гелий-3 (изотоп гелия-4), имеющий при атмосферном давлении самую низкую температуру кипения — 3,2 К.

## Получение криогенных температур магнитными методами

Магнитные способы охлаждения применяются для получения особо низких температур — ниже ~4 К, когда методы расширения сжатого газа становятся непригодными по своей физической сущности.

В 1926 г. Джиок и Дебай независимо друг от друга (почти повторилась история Кальете и Пикте) предложили новый метод охлаждения — адиабатическое размагничивание парамагнитных солей. Метод заключается в уменьшении энтропии парамагнитных веществ путем упорядочения ориентации магнитных моментов электронов действием внешнего магнитного поля. С движением электронов вокруг своей оси связана только часть общей энтропии вещества (так называемая магнитная), другая же часть, обычно большая, связана с тепловыми колебаниями кристаллической решетки. Так как прилагаемое внешнее магнитное поле воздействует на магнитную часть энтропии, то для уменьшения общей энтропии вещества, определяющей охлаждение, необходимо, чтобы энтропия решетки



действия магнитных моментов электронов (спинов) между собой и с кристаллической решеткой. Поэтому для магнитного охлаждения применяются парамагнитные соли, в которых сила взаимодействия уменьшена наличием большого числа немагнитных атомов, например, хромокалиевые или железоммониевые квасцы, соли редкоземельных элементов, некоторые органические соединения и т. п.

Напряженность магнитного поля, применяемого для намагничивания парамагнитных солей, составляет обычно 8—12 килоэрстед. Первое практическое магнитное охлаждение было осуществлено Джоном и Мак-Дугалом в 1933 г. Схема процесса показана на рис. 3. Камера с образцом парамагнитного вещества помещается в сосуд с жидким гелием, кипящим под пониженным давлением и потому имеющим температуру  $\sim 1$  К. Камера заполнена газообразным гелием для теплообмена между парамагнитным веществом и жидким гелием. Когда образец охлаждается до 1 К, включается магнитное поле и выделяющееся тепло намагничивания отводится от образца через теплообменный газ к ванне с жидким гелием, так что температура образца во время намагничивания не меняется. Затем теплообменный газ удаляется откачкой, образец теплоизолируется и магнитное поле выключается. Снятие магнитного поля приводит к понижению температуры образца.

Наинизшая температура, достигаемая адиабатическим размагничиванием парамагнитных солей, равна нескольким милликельвинам ( $1 \text{ mK} = 0,001 \text{ K}$ ). Дальнейшее понижение температуры можно получить, используя парамагнетизм не ионов, а самих ядер. Поскольку магнитные моменты ядер примерно в тысячу раз меньше магнитных моментов электронов, для успешного ядерного размагничивания требуются большие магнитные поля: порядка 100 килоэрстед при предварительном охлаждении вещества до 0,01 К.

Методом ядерного размагничивания меди получена и рекордно низкая на сегодняшний день температура порядка  $10^{-6} \text{ K}$  (в 1963 г. Н. Кюри с сотрудниками). Температуры ниже 1 К можно получать также путем намагничивания сверхпроводников, используя эффект охлаждения при изотропическом переходе из сверхпроводящего состояния в нормальное. Однако практически получаемые температуры здесь будут более высокие, чем при размагничивании парамагнитных солей.

была мала по сравнению с магнитной частью энтропии. Это имеет место при низких температурах порядка  $1 \div 4,5 \text{ K}$ , и потому магнитное охлаждение требует предварительного охлаждения до этих температур.

Теоретическая схема парамагнитного охлаждения показана на рис. 2, где приведена типичная энтропийная диаграмма парамагнитного вещества. Линия  $S_0$  представляет изменение энтропии рабочего вещества

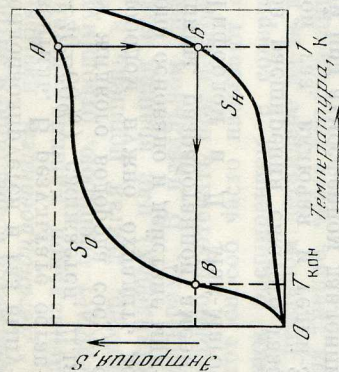


Рис. 2. Теоретическая схема магнитного охлаждения

без магнитного поля,  $S_n$  — изменение энтропии вещества в поле напряженностью  $H$ . Сам процесс магнитного охлаждения состоит из двух стадий: изотермического намагничивания парамагнитного вещества (линия А—Б) и адиабатического его размагничивания (линия Б—В). Намагничивание, подобно сжатию газа, приводит к выделению тепла, которое необходимо отвести, чтобы процесс был изотермическим.

Практически, выделяющееся при намагничивании тепло отводится от вещества с помощью жидкого гелия так, что начальная температура образца поддерживается постоянной на уровне  $\sim 1 \text{ K}$ . Энтропия образца при намагничивании уменьшается от  $S_0$  до  $S_n$ . Размагничивание проводится при возможно полной теплоизоляции рабочего вещества, и получаемая конечная температура  $T_{кон}$  соответствует точке В на кривой  $S_0$  с энтропией, равной той, которая была у вещества после намагничивания.

Предельное понижение температуры, которое можно достигнуть, зависит в первую очередь от изменения энтропии используемого вещества с температурой в отсутствие магнитного поля (кривая  $S_0$  на рис. 2). Характер этого изменения определяется силами взаимо-



Метод магнитного охлаждения является в своей основе периодическим, хотя на его основе разработаны устройства, в которых осуществляется и непрерывный циклический процесс. В такой магнитной холодильной машине парамагнитная соль с помощью тепловых ключей попеременно соединяется то с объемом жидкого гелия (при намагничивании), то с охлаждаемым объектом (при размагничивании). Магнитное охлаждение применяется, как правило, только в физических исследованиях, когда требуются температуры ниже 0,3 К. В последнее время для получения криогенных температур в области от  $\sim 0,3$  до  $\sim 0,005$  К магнитное охлаждение вытесняется более простым и удобным методом растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ , описанном ниже.

### Получение ультранизких криогенных температур растворением жидкого $^3\text{He}$ в $^4\text{He}$

Метод растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  является в настоящее время основным для получения ультранизких температур от  $\sim 0,3$  до 0,005 К. Благодаря высокой эффективности, непрерывности и простоте ведения процесса рефрижераторы растворения вытеснили в этой области температур магнитные методы охлаждения.

Метод основан на использовании эффекта охлаждения от растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ . Предположение о том, что растворение легкого изотопа  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  должно быть связано с поглощением тепла, было высказано Х. Лондоном в 1951 г., но только в 1962 г. Х. Лондон, Дж. Кларком и Б. Мендозой была разработана сама схема рефрижератора растворения. Первый успешно действовавший рефрижератор был создан в 1965 г. Б. Негановым, Н. Борисовым и М. Либургом в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна).

Действие рефрижератора растворения основано на свойстве жидких смесей  $^3\text{He}$ — $^4\text{He}$  при температурах ниже 0,88 К расслаиваться на две фазы, одна из которых более богата  $^3\text{He}$ , а другая более богата сверхтекучим  $^4\text{He}$ . Фаза, богатая  $^3\text{He}$ , имеет меньшую плотность и всплывает над фазой, обогащенной  $^4\text{He}$ . Если с помощью вакуум-насоса заставить  $^3\text{He}$  переходить из верхней фазы в нижнюю, то температура смеси будет понижаться (эффект растворения). Атомы  $^3\text{He}$  при

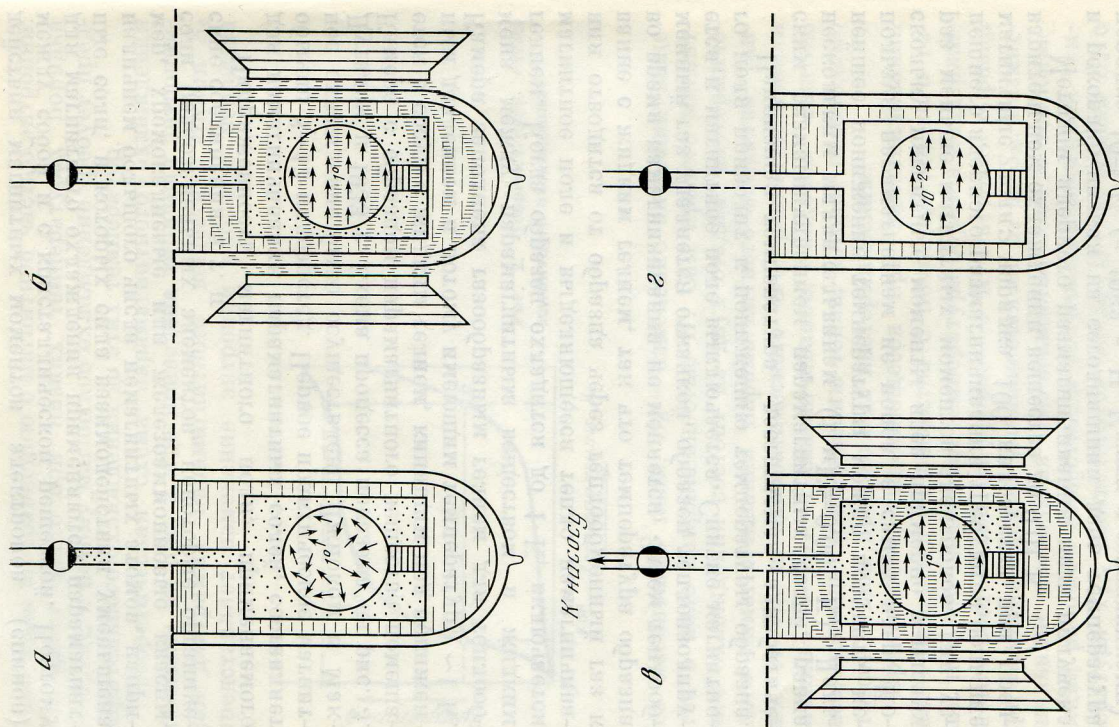
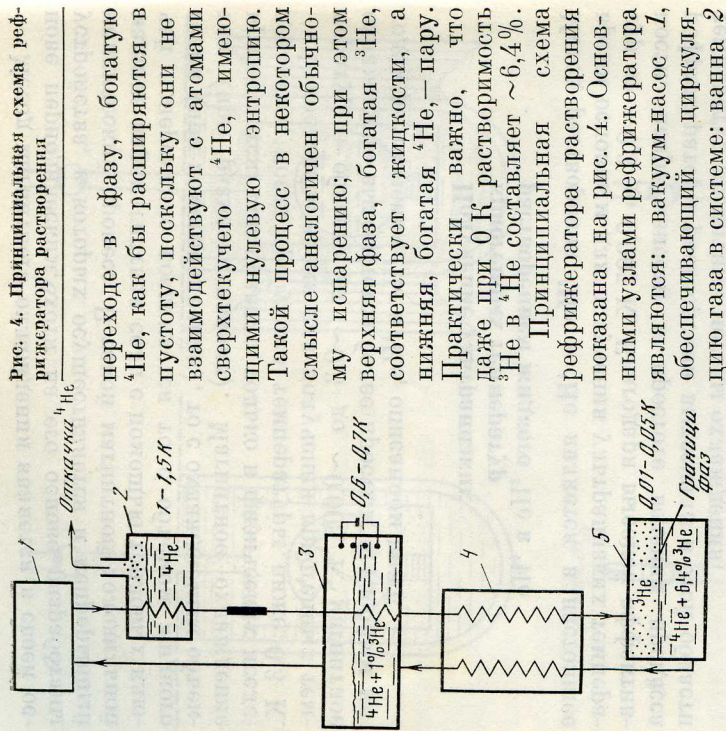


Рис. 3. Практические стадии процесса магнитного охлаждения  
а — охлаждение соли; б — намагничивание; в — откачка теплообменного газа; г — размагничивание



Рис. 4. Принципиальная схема рефрижератора растворения



жидкого  ${}^4\text{He}$ , кипящего под вакуумом для конденсации  ${}^3\text{He}$ ; камера испарения 3 с нагревателем; набор теплообменников 4 и камера растворения 5. Вакуум-насос откачивает из камеры испарения почти чистый  ${}^3\text{He}$  и сжимает его до давления 50–90 гПа (40–80 мм рт. ст.).

После предварительного охлаждения жидким азотом (на схеме не показано) сжатый  ${}^3\text{He}$  конденсируется в ванне 2 при температуре  $\sim 1-1,5$  К. Далее жидкий  ${}^3\text{He}$  проходит дроссель-капилляр 3, где его давление снижается до 1,5–15 Па, и, последовательно охладившись в камере испарения и системе теплообменников, поступает в камеру растворения. В камере растворения за счет перехода  ${}^3\text{He}$  в фазу, богатую сверхтекучим  ${}^4\text{He}$ , устанавливается сверхнизкая рабочая температура. Обратный поток газа из камеры растворения через систему теплообменников и камеру испарения поступает в вакуум-насос, и таким путем цикл замыкается.

Холодильная мощность рефрижераторов растворения резко зависит от температуры — в настоящее время она составляет примерно от 5–10 микроватт при 0,02 К и до нескольких милливатт при 0,10 К. Рекордная минимальная температура, достигнутая в рефрижераторах растворения, — около 3,5 мК. Рефрижераторы растворения серийно выпускаются промышленными фирмами Англии, США, ФРГ, Японии, СССР [5].

## Криогенные методы сжижения газов. Идеальный цикл сжижения

Одной из задач криогеники является сжижение газов с низкими температурами кипения — азота, водорода, гелия, кислорода и неона. Для перевода газа в жидкое состояние его необходимо охладить до температуры начала конденсации, а затем отвести от него теплоту конденсации. Температура конденсации газа равна его температуре кипения, а теплота конденсации равна теплоте испарения. Иногда употребляют выражение «скрытая теплота испарения», отражая тот факт, что во время испарения (так же, как и конденсации) температура жидкости не меняется, чем мы широко пользуемся в быту, когда кипятим воду.

Температуры кипения и конденсации, а также теплоты испарения и конденсации конкретной жидкости зависят от давления. С повышением давления температура кипения жидкости повышается, с понижением давления — понижается. Зависение этого положения из школьного курса физики приводит к интересным случаям. Так, известный французский альпинист Сесюри, один из покорителей Монблана, был чрезвычайно любопытен, поражен тем фактом, что не смог на Монблане сварить в кипящей воде яйца вкрутую. На высоте Монблана (4,8 км) давление атмосферы составляет 430 мм рт. ст., а под таким давлением вода кипит при  $85^\circ\text{C}$ , так что яйца вкрутую в ней действительно сварить трудно. Заметим, что понижив давление над водой до 4,5 мм рт. ст., ее можно довести до замерзания, так как при этом давление температура кипения воды равна  $0^\circ\text{C}$ . Что касается теплоты конденсации или испарения, то она, наоборот, с повышением давления уменьшается. Так, при давлении 1 атм теплота испарения жидкого азота равна 200 Дж/г, а при



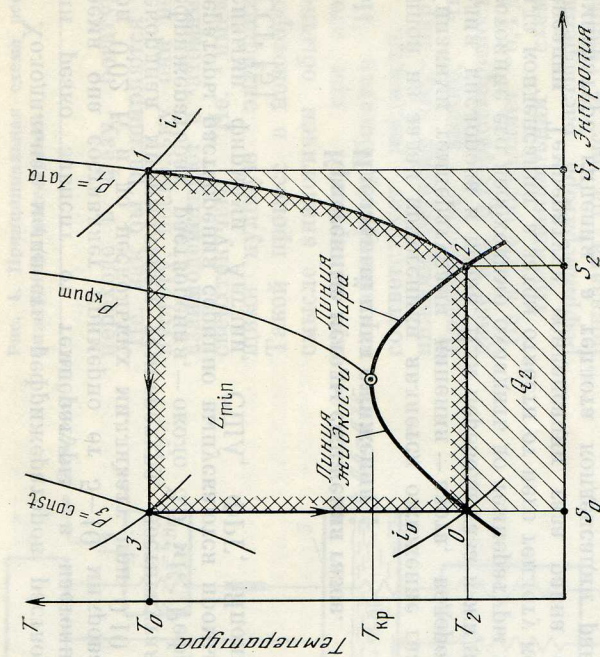


Рис. 5. Идеальный цикл ожижения газа

10 атм — 165 Дж/г. Минимальная работа, необходимая для ожижения газа, определяется из идеального цикла ожижения, показанного на рис. 5.

По оси ординат графика отложена абсолютная температура  $T$ , по оси абсцисс — энтропия  $S$ . Удобство  $T-S$  диаграмм состоит в том, что в них площадь под кривой, изображающей проводимый процесс, эквивалентна количеству затрачиваемого или получаемого тепла. Точка 1 на рис. 5 соответствует начальному состоянию газа (температура окружающей среды, давление — атмосферное), точка 2 — состоянию охлаждаемого газа перед началом конденсации (насыщенный пар) и точка 0—100% жидкости. Процесс 1—2 отражает охлаждение газа с комнатной температуры  $T_0$  до температуры конденсации  $T_2$ , процесс 2—0 — конденсацию газа при температуре  $T_2$  и атмосферном давлении. Площадь 1—2—0— $S_0$ — $S_1$  графически отражает количество тепла, отнимаемого от газа для его сжижения. Аналитически это тепло равно разности энтальпий (теплосодержания) газа в точке 1 ( $i_1$ ) и жидкости в точке 0 ( $i_0$ ).

Идеальный цикл сжижения может быть осуществлен путем изотермического сжатия газа от начального состояния до точки 3 (процесс 1—3) с последующим расширением его при постоянной энтропии (процесс 3—0). Площадь внутри контура 1—3—0—2—1 соответствует минимально необходимой работе сжижения  $L_{\text{сжж}}^{\text{мин}}$  [1]:

$$L_{\text{сжж}}^{\text{мин}} = T_0 (S_1 - S_0) - (i_1 - i_0).$$

На практике идеальный цикл сжижения не осуществляется, так как теоретически необходимое давление сжатия в точке 3 очень велико — сотни тысяч атмосфер. Значения минимальной работы сжижения в идеальном цикле используются как мера сравнения при анализе реальных циклов сжижения. Величины минимальной работы сжижения для разных газов приведены в табл. 2.

Из сравнения идеального цикла сжижения с циклом Карно следует, что минимальная работа сжижения в идеальном цикле меньше, чем затраты энергии на перенос такого же количества тепла в (тоже идеальном) цикле Карно. Это связано с тем, что в цикле Карно все тепло переносится с одного температурного уровня (так называемого низкого) на другой, более высокий, в то время как в идеальном цикле сжижения такое явление имеет место не для всего тепла, а только для тепла конденсации; охлаждение же газа от комнатной температуры до температуры начала конденсации осуществляется идеальным переносом тепла с последовательно понижающихся температурных уровней, т. е. бесконечно большим числом элементарных циклов Карно.

Действительные расходы энергии в работающих установках превышают теоретически минимальные в 5—10 раз, что свидетельствует о значительных возможностях улучшения технологических схем сжижения газов. Одним из путей усовершенствования схем сжижения является увеличение числа температурных уровней отвода тепла от сжижаемого газа. Чем больше уровней отвода тепла, тем ближе к идеальной реальной технологической схема. Так как ценность холода возрастает с понижением температуры, то введение предварительных ступеней охлаждения посторонними хладагентами (аммиак, фреон, жидкий азот и т. п.) всегда выгодно с энергетической точки зрения, ибо ве-



| Характеристика                                            | Азот     | Водород                | Гелий      | Кислород  | Неон                   |
|-----------------------------------------------------------|----------|------------------------|------------|-----------|------------------------|
| Молекулярная масса, г/моль                                | 28       | 2,016                  | 4,003      | 32        | 20,18                  |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                              | 1,25     | 0,09                   | 0,178      | 1,43      | 0,9                    |
| газа                                                      | 808      | 71                     | 125        | 1136      | 1206                   |
| жидкости                                                  | 1,25     | 0,09                   | 0,178      | 1,43      | 0,9                    |
| Нормальная температура кипения ( $T_{кип}$ ), К           | 77,3     | 20,4                   | 4,2        | 90,18     | 27,1                   |
| (°С)                                                      | (-195,8) | (-252,7)               | (-268,9)   | (-183)    | (-246)                 |
| Температура затвердевания, К                              | 63,15    | 13,9                   | —          | 54,4      | 24,5                   |
| Теплота испарения, кДж/кг                                 | 197,6    | 454,2                  | 20,4       | 212,3     | 85,8                   |
| кДж/л                                                     | 160      | 32                     | 2,6        | 240       | 106                    |
| Теплота плавления, кДж/кг                                 | 25,7     | 58,2                   | 4,6        | 13,9      | 16,3                   |
| кДж/л                                                     | 206      | 3250                   | 1430       | 170       | 260                    |
| Теплота нагрева паров от $T_{кип}$ до 280 К, Дж/л         | 643      | 788                    | 700        | 800       | 1340                   |
| Объем газа от испарения 1 л жидкости, л при °С и 1 атм    | 0,172    | 0,235                  | 0,237      | 0,202     | 0,445                  |
| Теоретически минимальная работа сжижения кВт·ч/л жидкости | 1-1,5    | 1,5-3,0                | 2-4        | 1,2-1,7   | 3-4,5                  |
| Практический расход энергии на сжижение, кВт·ч/л          | 4-6 коп. | 25 коп./м <sup>3</sup> | 12-14 руб. | 4-15 коп. | 35 руб./м <sup>3</sup> |
| Цена 1 л жидкости (1989 г.)                               |          |                        |            |           |                        |

Таблица 2. Основные характеристики криогенов

дет к понижению расхода энергии на получение конечного криопродукта.

Практическое использование сжиженных газов с низкими температурами кипения (их называют криогенными жидкостями) непрерывно расширяется, что стимулирует интенсивный рост их производства. Особенно это относится к жидким азоту, водороду и гелию. Жидкие азот и гелий являются в настоящее время наиболее универсальными средствами криогенного охлаждения, а жидкий водород — прекрасное топливо для ракетных и других двигателей.

## Глава 4. О двух криогенных «сверхъявлениях»

Речь идет о двух замечательных физических явлениях — сверхпроводимости веществ и сверхтекучести жидкого гелия. Хотя по практической значимости они несопоставимы (использования сверхпроводимости безграничны), однако физическая сущность их во многом одинакова, а изучение их расширяют наши познания фундаментальных законов природы.

### Сверхпроводимость

Сверхпроводимость занимает в науке и технике не только очень важное, но и совершенно особое место. Являясь по своему энергетическому и техническому значению грандиозной проблемой, сверхпроводимость почти полвека оставалась загадочным явлением. Природа сверхпроводимости была выяснена лишь в 1957 г. — через 46 лет после открытия этого явления. В наше время такой долгий срок для объяснения научной загадки является редкостью. Но дело, конечно, не в этом, а в своеобразии свойств, которыми обладают сверхпроводящие материалы. Важнейшее их свойство, отраженное в самом названии, состоит в том, что постоянный электрический ток течет по сверхпроводящей цепи, не испытывая никакого сопротивления. Сверхпроводимость наблюдается далеко не у всех веществ и только при определенных условиях, а именно если температура материала будет ниже определенной критической температуры  $T_k$ , а сила тока ( $I$ ) и напря-



женность магнитного поля ( $H$ ) также будут ниже их критических значений  $I_k$  и  $H_k$ . Критические значения тока  $I_k$  и напряжения  $H_k$  зависят от температуры и стремятся к нулю при приближении температуры сверхпроводника к его критической температуре  $T_k$ .

Как известно, все проводники электричества, а ими являются главным образом металлы и их сплавы, имеют определенное значение электрического сопротивления. Электрический ток представляет собой перемещение свободных электронов между атомами, образующими кристаллическую решетку металла. Это перемещение можно представить как протекание некой «электронной жидкости» сквозь решетку кристалла. Таким образом, прохождение электрического тока сводится к течению этой электронной жидкости по проводу под действием электрического поля. Протекая в промежутках между атомами решетки, эта жидкость испытывает как бы трение, что и обуславливает электрическое сопротивление проводника. Энергия электрического тока уходит на преодоление этого трения, переходит в тепло, нагревающее проводник тока. Упомянутым выражением «электронная жидкость» подчеркивается, что в твердых телах электроны не движутся независимо друг от друга, как летают молекулы в разреженном газе, а находятся в сильном взаимодействии, подобно молекулам жидкости.

Величина электрического сопротивления данного проводника тока зависит от состояния его кристаллической решетки. Чем в решетке больше различных неупорядоченностей, тем электрическое сопротивление больше. Существует много причин, влияющих на возникновение таких неупорядоченностей. Прежде всего геометрическая правильность решетки существенно нарушается тепловым движением атомов. Если температура будет достаточно высокой, смещения атомов становятся настолько большими, что вся решетка разваливается: вещество плавится. С понижением температуры правильность решетки восстанавливается в той или иной степени. Вследствие этого электрическое сопротивление веществ зависит от температуры. Например, понижая температуру куска медного провода, можно уменьшить его сопротивление в сотни раз. Однако, начиная с некоторой низкой температуры, сопротивление перестает убывать. Это означает, что тепловые колебания атомов, существующие еще при этих темпе-

ратурах, уже не играют существенной роли, а электрическое сопротивление определяется нарушением правильности решетки другими причинами. К ним относятся различные примеси, вклинивающиеся в решетки, механические воздействия (сжатие, растяжение, изгиб), неправильное расположение атомов на границах кристаллов и т. д. Все эти причины приводят к возникновению электрического сопротивления, которое от температуры не зависит.

Таким образом, в общем случае чистые металлы имеют меньшее сопротивление, чем металл с примесями или сплавы. Устраняя причины, нарушающие правильность кристаллической решетки (уменьшая тепловое движение, очищая металл, делая образец из одного кристалла и др.), мы можем уменьшить электрическое сопротивление металла в тысячи раз по сравнению с его величиной при комнатной температуре. Но поскольку изготовить идеальный монокристалл и достигнуть абсолютного температурного нуля — дело принципиально невозможное, постольку кажется невозможным иметь вещество, не обладающее электрическим сопротивлением.

Однако в 1911 г. Камерлинг-Оннесом было открыто явление, опровергающее обычную теорию электропроводности металлов. Во время опытов по изучению зависимости сопротивления ртути от температуры он обнаружил, что при температуре 4,12 К электрическое сопротивление ртути внезапно исчезло и при более низких температурах продолжало оставаться равным нулю. Явление было названо им «сверхпроводимость», а температура перехода из нормального в сверхпроводящее состояние получила название критической и обозначается символом  $T_k$ . В дальнейшем было установлено, что свойством сверхпроводимости обладают не только ртуть, но и другие металлы, различные их сплавы и даже некоторые органические вещества.

За многие годы, прошедшие со времени открытия сверхпроводимости, было найдено и создано свыше тысячи сверхпроводящих веществ и соединений, но вплоть до 1986 г. температура их перехода из нормального в сверхпроводящее состояние оставалась очень низкой и не превышала 24 К. В табл. 3 в качестве примера приведены значения критической температуры перехода для некоторых наиболее распространенных сверхпроводников.



Т а б л и ц а 3. Критическая температура перехода некоторых сверхпроводников

| Чистые материалы | $T_K$ , К | Сплавы                       | $T_K$ , К |
|------------------|-----------|------------------------------|-----------|
| Алюминий         | 1,2       | Ниобий — олово ( $Nb_3Sn$ )  | 18        |
| Индий            | 3,4       | Ниобий — титан               | 10,6      |
| Ниобий           | 9,2       | Ниобий — цирконий            | 10,8      |
| Ртуть            | 4,45      | Ниобий — алюминий            | 18,6      |
| Свинец           | 7,2       | Ванадий — кремний            | 17,1      |
| Олово            | 3,7       | Ниобий — алюминий — германий | 20,7      |
| Тантал           | 4,5       | Ниобий — германий            | 23        |

Хотя природа сверхпроводимости оставалась неизвестной до 1957 г., экспериментальные исследования этого явления позволили установить многочисленные важные для практики и будущей теории факты. Так, например, было показано, что сверхпроводящие металлы при температуре ниже критической становятся идеальными диамагнетиками, т. е. магнитное поле не проникает внутрь сверхпроводника. Обычные металлы, помещенные в магнитное поле, в той или иной степени пропускают магнитные силовые линии. Например, ферромагнитные материалы (железо и др.) втягивают в себя эти линии и сгущают их. В висмуте магнитные силовые линии, наоборот, несколько разрежены. Сверхпроводники же все магнитные линии полностью выталкивают из себя. Этот факт получил название «эффект Мейснера», по имени немецкого физика В. Мейснера, открывшего в 1933 г. это явление. Было установлено, что по своим магнитным свойствам все сверхпроводники делятся на две группы: сверхпроводники первого рода и сверхпроводники второго рода. Эффект Мейснера в чистом виде наблюдается только в сверхпроводниках первого рода, к которым относятся все элементарные сверхпроводники, кроме ниобия. Ниобий, сверхпроводящие сплавы и химические соединения относятся к сверхпроводникам второго рода. Сверхпроводники второго рода обладают более высокими значениями критической температуры и выдерживают более высокие магнитные поля, чем сверхпроводники первого рода.

В сверхпроводниках второго рода магнитное поле

постепенно проникает внутрь сверхпроводника (т. е. отсутствует эффект Мейснера), но проникает, как это установил А. А. Абрикосов, очень своеобразно в виде вихревых нитей. Эти магнитные нити как бы закрепляются, фиксируются на любого вида неоднородности материала, а транспортный ток может течь без сопротивления по области сверхпроводящего материала.

Более высокие критические температуры и большие допускаяемые магнитные поля определили, что для практических применений используются именно сверхпроводники второго рода. В СССР для изготовления сверхпроводящих магнитов чаще всего используются сплавы: ниобия и титана (НТ-50), ниобия и циркония (НЦ-50), ниобия-титана-циркония (65 БТ). Эти сплавы выпускаются в промышленном масштабе.

Современную теорию сверхпроводимости создали в 1957 г. американские физики Бардин, Купер и Шриффер (сокращено она называется теория БКШ). Следует отметить, что и до 1957 г. существовал целый ряд теорий сверхпроводимости — теория братьев Лондонов, теория ЛГ — Ландау и Гинзбурга, теория ГЛАГ — Ландау, Гинзбурга, Абрикосова, Горькова. Однако в них использовались параметры  $T_K$  и  $H_c$ , взятые из опытов. В теории же БКШ впервые критическая температура  $T_K$  связана с характеристиками самого материала. Согласно теории БКШ, причиной возникновения сверхпроводимости является притяжение электронов, в результате чего образуются связанные между собой пары электронов (куперовские пары). Возможность такого притяжения электронов несколько неожиданна, так как со школьных лет всем известен закон Кулона, согласно которому одноименные заряды отталкиваются с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Поэтому два электрона должны отталкиваться, что и имеет место, если рассматривать два изолированных электрона. Положение меняется, если рассматриваемые электроны находятся в среде, где присутствует большое количество других электронов и ионизированных атомов. В этих условиях часть электронов (с учетом всех других частиц, образующих кристаллическую решетку) могут притягиваться и образовывать пары. В таком спаренном состоянии электроны не рассеиваются на примесях, других неоднородностях или тепловых колебаниях кристаллической решетки. А так как электрическое сопро-



тивление при прохождении тока обусловлено именно таким рассеянием электронов, то при его исчезновении электросопротивление становится равным нулю и возникает сверхпроводимость. Таким образом, для возникновения сверхпроводимости необходимо, чтобы появилось притяжение между электронами, приводящее к их спариванию.

Грубые оценки возможной максимальной критической температуры сверхпроводника по теории БКШ дают значения порядка 30–40 К. Но гарантий, что сверхпроводимость не может быть и при более высокой температуре, нет.

Технические применения сверхпроводимости ограничиваются в первую очередь значениями температуры перехода  $T_c$ , разрушающими сверхпроводимость величинами напряжения и тока. Если бы этих ограничений не было, то сверхпроводники буквально господствовали бы во всех электротехнических и радиотехнических устройствах. Сейчас повсеместно: в электроприборах, телевизорах, линиях электропередач, радиоприемниках, трансформаторах, обладающие везде используются обычные проводники, обладающие электрическим сопротивлением и потому нагревающиеся при прохождении через них тока. Потери при нагревании заметно снижают коэффициент полезного действия электротехнических и радиотехнических устройств. Кроме того, нагрев проводников тока порождает дополнительные технические трудности и ограничения, связанные с необходимостью отвода этого тепла во избежание нагрева или разрушения самих проводников тока. Замена обычных проводников тока на сверхпроводящие дало бы колоссальный экономический эффект и, кроме того, позволило бы создать целый ряд машин, приборов и устройств более легких, компактных и надежных, чем существующие.

Ограничения, связанные со значениями критического напряжения ( $H_c$ ), у сверхпроводников сейчас преодолены — найдены сверхпроводящие материалы, выдерживающие магнитные поля в сотни тысяч гаусс. В результате созданы и все шире применяются очень жесткие и легкие по весу сверхпроводящие магниты. Но критические температуры перехода в сверхпроводящее состояние продолжают оставаться очень низкими, и все сверхпроводящие устройства приходится охлаждать пока только дорогостоящим жидким гелием.

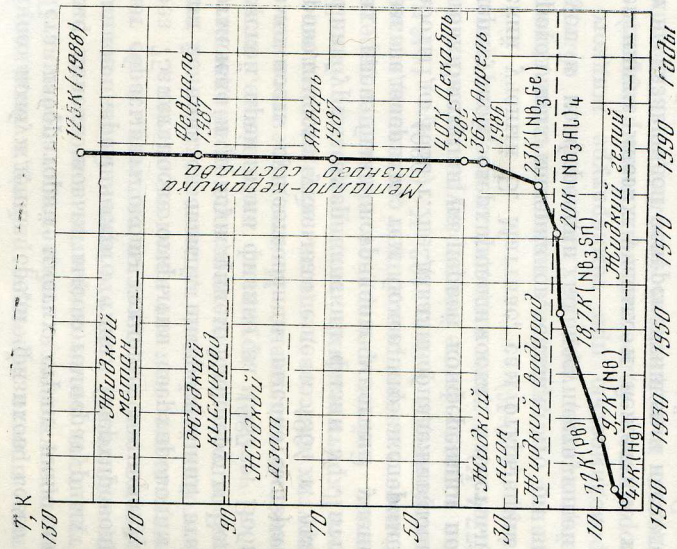


Рис. 6. Достигнутые температуры сверхпроводящего перехода

Вплоть до середины 1986 г. поиски высокотемпературных сверхпроводников не приводили к существенным успехам, что иллюстрирует рис. 6, на котором показаны достигнутые значения критической температуры. За последние 30 лет (начиная с 50-х годов) критическая температура существования сверхпроводимости поднялась на 5 градусов, достигнув лишь ~24 К. Положение стало резко меняться с середины 1986 г., когда сотрудники Швейцарского отделения ИБМ И. Беднорц и К. Мюллер обнаружили у металло-керамик, содержащих барий—лантан—медь—кислород, сверхпроводимость при 32–36 К. А с начала 1987 г. стали перманентно поступать сенсационные сообщения из лабораторий многих стран (СССР, США, Японии и др.) о получении сверхпроводящих переходов у металлокерамик разного состава при температурах порядка 80, 90, 100 К и даже еще более высоких, превосходящих криогенные. Прорыв в область высокотемпературной сверхпроводимости был сделан, что вызвало не-



обычайное возбуждение среди физиков всего мира. Около ста лабораторий многих стран включились в активные поиски новых высокотемпературных сверхпроводников керамического типа. Сверхпроводимость начинает сбрасывать оковы гелиевых температур.

Через 75 лет после открытия сверхпроводимости в изучении ее начался новый, интереснейший этап, что было отмечено и присуждением Мюллеру и Беднорцу Нобелевской премии по физике за 1987 г. Вообще же на возможность существования высокотемпературной сверхпроводимости указывал еще в 1964 г. академик В. Л. Гинзбург и американский физик У. Литтл. Однако их идеи были встречены многими учеными с большим недоверием, тем более что экспериментальные работы до 1986 г. не давали обнадеживающих результатов. Выступая на первой конференции по высокотемпературной сверхпроводимости, известный американский ученый Б. Маттиас, сам открывший много сверхпроводящих материалов, сказал, что он впервые участвует в конференции по несуществующей проблеме.

Скептицизм многих ученых и нежелание тратить усилия на казавшиеся перспективными исследования явились одной из причин, по которой открытие высокотемпературной сверхпроводимости так затянулось. Сыграла, конечно, свою роль и весьма сильная разобщенность ученых различных специальностей. И здесь судьба, как это часто бывает, подшутила над учеными. Дело в том, что соединения, на которых Мюллер и Беднорц обнаружили высокотемпературную сверхпроводимость, были синтезированы в лабораториях многих стран (СССР, США, Японии и др.) довольно давно. В СССР такие металлокерамики были созданы более 10 лет назад\*, но авторы изучали эти соединения только с точки зрения химии, а сверхпроводимость их не интересовала. Обвинить их за это нельзя, но все же очень досадно, что они не догадались исследовать зависимость электрического сопротивления своих соединений от температуры. Это привело бы к тому, что высокотемпературная сверхпроводимость была бы открыта на десять лет раньше, и у нас — в СССР, а не за границей. Такова еще одна упущенная возможность

\* См.: Шарыгин И. Б., Козан Б. Г., Лазарев В. Б. // Журн. пер. орган. химии. 1979. Т. 24. С. 1478.

превратить просто хорошую работу в выдающуюся, за которую присуждается нобелевская премия. Прошло почти три года после открытия высокотемпературной сверхпроводимости, и за это время было показано, что ею обладают многие десятки веществ, а не какое-то одно, уникальное, как это казалось сначала.

На сегодняшний день вещества с высокой температурой сверхпроводящего перехода принадлежат в основном к четырем группам: лантановые, иттриевые, висмутовые и таллиевые. Можно надеяться на открытие и других классов веществ, обладающих еще более высокими критическими температурами, близкими к комнатным. Сейчас рекордное значение перехода из нормального в сверхпроводящее состояние в известных металлокерамиках равно 162 К (минус 111°С). Это значение гораздо выше температуры кипения жидкого азота (77,4 К) и даже выходит за пределы криогенных температур (120 К).

Создание материалов, технологически пригодных для изготовления крупных изделий и обладающих сверхпроводимостью при температуре жидкого азота (не говоря уже о более высоких температурах), должно привести к подлинной революции для этого следующего десятилетия. Экономические основания для этого следующие. Во-первых, стоимость жидкого азота в 150—200 раз ниже стоимости жидкого гелия (коммерческая цена жидкого гелия сейчас 11—12 руб./л, а азота 5—6 коп./л). Во-вторых, затраты энергии на поддержание «гелиевых» температур гораздо выше чем «азотных» — теоретически в 25 раз, а практически еще больше. И, наконец, теплота испарения 1 кг жидкого азота почти в 10 раз больше, чем гелия, т. е. количество криогента, необходимого для поддержания работоспособности сверхпроводящей системы, будет существенно меньше, а сами системы конструктивно более простыми.

Таким образом, применение жидкого азота вместо жидкого гелия в практических сверхпроводящих устройствах дает двойной выигрыш: резко уменьшаются и стоимость охлаждающей среды, и энергопотребление соответствующих криогенных установок. Пока еще рано говорить о широком практическом использовании вновь открытых высокотемпературных сверхпроводников, так как требуется некоторое время, чтобы довести их физические и технологические показатели до



характеристик лучших материалов, которые сейчас используются в крупных сверхпроводящих магнитах и других сверхпроводящих изделиях. Предстоит пересмотреть и теорию сверхпроводимости, поскольку принятая в настоящее время теория БКШ ограничивает температуру сверхпроводящего перехода в  $\sim 40$  К.

Главные трудности практического использования новых сверхпроводников состоят в преодолении их хрупкости, увеличении допускаемых критических значений тока и одновременном сохранении сверхпроводящих свойств без изменений, т. е. стабильности. Но уже теперь можно делать сверхпроводящие переключатели, магнетометры и другие изделия слаботочной техники, работающие в жидком азоте, а не в гелии.

Несколько слов о том, при какой температуре сверхпроводник относится к классу высокотемпературных. В настоящее время охлаждение, необходимое для поддержания сверхпроводящего состояния, производится с помощью криогенных жидкостей — жидкого гелия ( $T_{\text{кип}} = 4,2$  К), жидкого водорода ( $T_{\text{кип}} = 20,4$  К), жидкого азота ( $T_{\text{кип}} = 77,4$  К) и др. С инженерной точки зрения высокотемпературными следует считать сверхпроводники с критическими температурами перехода выше  $\sim 80$  К, т. е. могущие работать в жидком азоте. Таких соединений становится все больше и больше, хотя пока вопрос о реальных сверхпроводящих материалах будущего еще не решен. Во всяком случае, первый, очень важный этап на пути к высокотемпературной сверхпроводимости сделан, и он сулит большие надежды в будущем. Открытие высокотемпературной сверхпроводимости будет отнесено к числу самых крупных научно-технических достижений XX в.\*

### Сверхтекучесть жидкого гелия

Жидкий гелий занимает в науке и технике особое место. Это — одно из главных, а в области ниже  $\sim 10$  К единственное вещество для получения криогенных температур. Обладая самой низкой температурой кипения из всех элементов таблицы Менделеева, жидкий гелий не затвердевает вплоть до абсолютного нуля. Он оста-

\* Более подробные сведения о природе сверхпроводимости можно найти в прекрасной статье академика В. Л. Гинзбурга, опубликованной в журнале «Природа» (№ 7 за 1987 г.).

ется в жидком состоянии, когда все другие вещества затвердевают. Это связано с квантовой природой жидкого гелия при низких температурах. Даже при абсолютном нуле атомы гелия обладают слабым взаимодействием и большой нулевой энергией, достаточной для того, чтобы не допускать кристаллизации. Твердый гелий может быть получен лишь при давлениях больших 25 атм. Необычные свойства жидкий гелий приобретает при температуре  $T_\lambda = 2,17$  К, когда он переходит в сверхтекучее состояние, открытое академиком

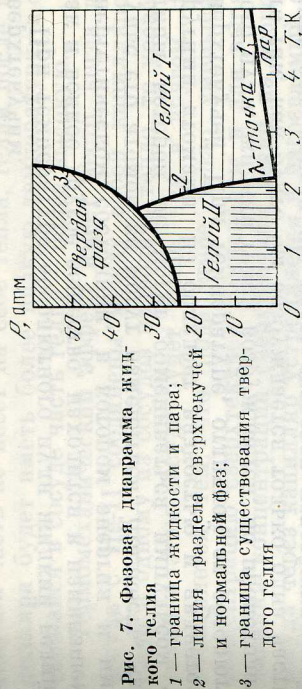


рис. 7. Фазовая диаграмма жидкого гелия  
1 — граница жидкости и пара;  
2 — линия раздела сверхтекучей и нормальной фаз;  
3 — граница существования твердого гелия

П. Л. Капицей в 1938 г. Этот переход принято называть  $\lambda$ -переходом (по виду кривой, изображающей зависимость теплоемкости гелия от температуры, которая напоминает греческую букву «лямбда»), а температуру перехода  $T_\lambda$  —  $\lambda$ -точкой.

Чтобы подчеркнуть отличия в свойствах обычного и сверхтекучего гелия, состояние его при температурах выше  $T_\lambda$  обозначают He-I, ниже — He-II. Фазовая диаграмма для гелия представлена на рис. 7. Свойства He-I во многом похожи на свойства обычных жидкостей, когда как He-II представляет собой яркий пример квантовой жидкости и обладает рядом особенностей, резко отличающих его от классических жидкостей. Характерным свойством He-II является сверхтекучесть, заключающаяся в том, что он практически без вязкости свободно протекает через узкие капилляры или щели. Теорию, объясняющую это квантовое явление, создал в 1941 г. академик Л. Д. Ландау, в 1961 г. он получил за нее Нобелевскую премию. В экспериментах жидкий He-II ведет себя так, как если бы он состоял из двух частей: из обычной жидкости, переносящей кванты тепла и обладающей опре-



деленной вязкостью (так называемая нормальная компонента), и из сверхтекучей жидкости, не несущей тепла, имеющей нулевую энтропию и не обладающей вязкостью (сверхтекучая компонента). Рассмотрение жидкого гелия как смеси двух компонентов — лишь удобный прием для описания свойств гелия ниже  $\lambda$ -точек. Как и всякое описание квантовых явлений в терминах классической механики, оно не является вполне адекватным. Правильнее говорить о нормальной и сверхтекучей массах жидкости, связанных с двумя одновременно возможными движениями — нормальным и сверхтекучим.

При температуре абсолютного нуля жидкий гелий, как и всякое другое вещество, находится в наименьшем энергетическом состоянии, в котором энергия и импульс его атомов не могут изменяться. Жидкость, частицы которой не могут обмениваться импульсом с другими атомами, не обладает вязкостью и является сверхтекучей. При температуре, отличной от абсолютного нуля, жидкий гелий возбуждается, но происходит это так, как будто бы возбуждается только одна часть жидкости, другая же часть остается невозбужденной, оставаясь в том же состоянии, в каком она была бы при абсолютном нуле. По мере понижения температуры от 2,17 К ( $\lambda$ -точки) доля гелия, переносящего тепло (нормальной компоненты), уменьшается, а доля сверхтекучей части возрастает, так что при абсолютном нуле весь гелий становится сверхтекучим.

Помимо сверхтекучести, He-II обладает и рядом других свойств, отличающих его от обычных жидкостей: громадной теплопроводностью, движущейся пленкой, механокалорическим и термомеханическим эффектами. Механизм теплопередачи в He-II имеет своеобразный конвекционный характер и принципиально отличается от обычной теплопроводности (так, например, он зависит от температурного градиента и геометрии теплопередающих поверхностей). От нагретой стороны идет поток нормальной части He-II, переносящей тепло, а навстречу ему — поток сверхтекучий, так что результирующий макроскопический ток в гелии нет. Как установил П. Л. Капица, такой механизм дает очень большие величины теплопроводности — в тысячи раз превышающие теплопроводность меди или серебра. Громадная теплопроводность сверхтекучего гелия объясняет визуально наблюдаемый переход He-I в

He-II: поверхность кипящего жидкого гелия при достижении  $\lambda$ -точки внезапно становится совершенно спокойной.

Механокалорический эффект заключается в том, что если He-II передавливать через узкую щель (капилляр) из одного сосуда в другой, то температура оставшейся части гелия несколько повышается. Это происходит потому, что капилляр служит как бы энтропическим фильтром, через который преимущественно проходит сверхтекучая часть гелия. Поскольку сверхтекучая часть не несет на себе тепла, гелий после капилляра будет иметь более низкую температуру, а оставшаяся в сосуде часть гелия — более высокую.

Термомеханический эффект имеет место, когда два сосуда с He-II соединены между собой капилляром. Если к одному из сосудов подводить тепло, то уровень гелия в этом сосуде будет выше, чем в другом. Это объясняется тем, что подводимое тепло уменьшает концентрацию сверхтекучей компоненты и для выравнивания концентрации сверхтекучий гелий из второго сосуда через капилляр устремляется в нагрываемый сосуд и тем самым повышает в нем уровень жидкости.

При использовании He-II в качестве охлаждающего вещества важную роль, помимо большой его теплопроводности, играет его способность образовывать на вертикальных стенках тонкий слой ( $\sim 3 \cdot 10^{-6}$  см) пленки сверхтекучего гелия, которая непрерывно поднимается по стенке в зону более высоких температур. Как известно, пленка может образовываться любой жидкостью, смачивающей твердую поверхность, однако подъем и вытекание жидкого гелия из сосуда по пленке обусловлена его сверхтекучестью и не наблюдаются ни у какой другой жидкости. Именно эта пленка, испаряясь, затрудняет откачку паров жидкого He-II и этим практически ограничивает возможность получения температур сверхтекучего жидкого гелия ниже  $\sim 1$  К.

При определенной скорости течения (она называется критической) сверхтекучесть разрушается. Скорость эта зависит от геометрических размеров и колеблется от 26 см/с для узких щелей размером  $10^{-4}$  см до 1 см/с в больших щелях. Разрушение сверхтекучести при столь малых значениях скорости связано с возникновением в сверхтекучем гелии возбуждений особого типа — квантовых вихрей, подобных имеющимся в сверхпроводниках второго рода. Существование



квантовых вихрей He-II подтверждено опытом. С явлением вихреобразования связывают особенности процессов теплопередачи и гидродинамики в He-II, однако объяснить все своеобразие свойств He-II теория пока не может. Состояние теории не мешает расширению областей практического использования сверхтекучего He-II как криоагента. Наиболее перспективно криогенное использование He-II в космических исследованиях, в ядерной физике и энергетике.

В 1972 г. было открыто, что при очень низких температурах (ниже 3 милликельвинов) легкий изотоп гелия  $^3\text{He}$  становится сверхтекучим.

## Глава 5. Техника получения криогенных температур и сжижения газов

### Общие соображения

Как уже указывалось выше, основным методом получения криогенных температур и сжижения газов с низкими температурами кипения является расширение сжатого газа. Другие методы — магнитные, десорбционные, растворения и т. д. — являются обычно дополнительными и применяются только в установках специального назначения.

Общая тенденция развития современной криогенной техники заключается в снижении рабочего давления в холодильных циклах, что дает возможность применять для сжатия газов турбокомпрессоры, а для расширения — турбодетандеры. Тенденция к замене поршневых машин турбинными связана со значительными преимуществами последних по коэффициенту полезного действия, надежности работы, простоте обслуживания, весу и габаритам. Кроме того, в турбокомпрессорах сжимаемый газ не загрязняется парами масла, как это имеет место в поршневых машинах, смазываемых маслом. Для криогенных процессов это имеет существенное значение, так как при охлаждении газа пары масла будут замерзать и забивать аппаратуру.

Реальные газы, с которыми имеет дело криогенная техника, даже если они не загрязняются маслом в про-

цессе сжатия, обычно содержат целый ряд примесей, которые при понижении температуры газа могут перейти в твердое состояние и нарушить процесс охлаждения. Поэтому рабочий газ после сжатия должен быть очищен от таких примесей. Так, например, воздух перед охлаждением должен быть очищен от паров воды и углекислоты, водород и гелий — от примесей воздуха и т. д. Время непрерывной работы криогенной установки чаще всего лимитируется именно степенью очистки рабочего газа от замерзающих примесей, которые, накапливаясь, забивают аппаратуру и выводят установку из строя. Наряду с машинами для сжатия газа узел очистки от примесей является необходимой составной частью всякой криогенной установки, перерабатывающей газ с целью получения криогенных температур или продуктов.

Однократное расширение сжатого газа с комнатной температурой реально дает понижение температуры только на несколько десятков градусов. Поэтому для получения криогенных температур в схему охлаждения вводятся теплообменные устройства, позволяющие накапливать и эффективно использовать холод, получаемый от расширения газа. С помощью теплообменников температура сжатого газа перед расширительным устройством последовательно понижается с комнатной температуры до значения, достаточного для получения заданной криогенной температуры после однократного расширения. Промышленное производство многих важных для современной техники веществ, как, например, азота, кислорода, аргона, дейтерия и других, связано с сжижением и разделением соответствующих газовых смесей. В этом случае в состав криогенной установки входят ректификационные колонны, в которых сжиженная газовая смесь разделяется на желаемые компоненты.

Таким образом, криогенная установка для комплексной переработки воздуха или других газовых смесей состоит из следующих основных частей: машин для сжатия газа, системы очистки газа, расширительных устройств для производства холода, системы теплообменников для охлаждения и сжижения отдельных компонентов смеси. В случаях, когда исходным сырьем является не смесь газов, а один газ (например, в сжижении водорода или гелия), узел ректификации отсутствует.



Главными факторами, влияющими на выбор конкретной технологической схемы и конструкции отдельных узлов установок, являются: температурный уровень производимого холода, характер исходного сырья, назначение и мощность установок.

Одной из существенных особенностей криогенных установок является необходимость хорошей теплоизоляции всех узлов, имеющих рабочую температуру ниже окружающей среды. Эффективность работы реальной криогенной установки непосредственно зависит от решения проблемы теплоизоляции ее низкотемпературных узлов. Чем ниже рабочая температура узлов криогенной установки, тем сложнее защитить их от притоков тепла из окружающей среды.

По температурному уровню вырабатываемого холода все криогенные установки можно разделить на три группы, соответствующие трем основным температурам: 80, 20 и 4 К. Эти температуры близки к температурам кипения жидких азота, водорода и гелия — наиболее характерным криопродуктам, вырабатываемым в каждой группе. Условность выбора температуры, определяющей группу установок, заключается в том, что действительные рабочие температуры внутри каждой группы могут отличаться от приведенных значений. Так, например, к установкам первой группы с условной температурой 80 К относятся установки сжижения природного газа, работающие при 110–115 К, ко второй группе — установки сжижения неона (температура кипения неона  $\sim 27$  К), к третьей — все криогенные системы с температурой ниже  $\sim 40$  К. Отличительные особенности установок каждой группы изложены в следующих разделах, здесь же мы рассмотрим некоторые общие технические проблемы, присущие всем криогенным установкам.

### Основные холодильные циклы

Холодильные циклы современных криогенных установок, особенно крупных, в большинстве случаев основываются на расширении сжатого газа двумя способами: в дроссельных устройствах с использованием эффекта Джоуля—Томсона; в специальных расширительных машинах (детандерах) с производством внешней работы. Оба способа могут применяться как по отдельности, так и совместно, причем количество детандеров и

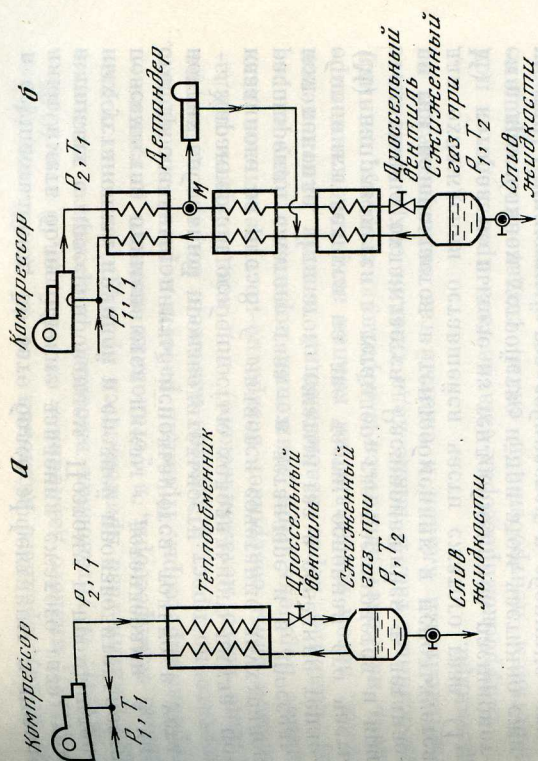


Рис. 8. Схемы основных холодильных циклов: а) с дросселированием (а) и с детандером (б)

ступеней дросселирования может быть различным. Физические основы получения холода этими методами изложены выше. На рис. 8 приведены схемы двух холодильных циклов, наиболее часто используемых в криогенной технике: цикл простого дросселирования (а) и цикл с одним детандером и дополнительным дросселированием ступенью (б). Холодильный цикл простого дросселирования пригоден для охлаждения и сжижения газов, у которых температура инверсии Джоуля—Томсона эффекта выше комнатной (например, воздух, азот, кислород и др.). Для газов, имеющих инверсионную температуру ниже комнатной (водород, гелий, неон), дросселирование дает понижение температуры только при их предварительном охлаждении посторонними хладагентами до температур существенно ниже инверсионных. Так, при сжижении водорода и неона в холодильном цикле с дросселированием предварительное охлаждение осуществляется жидким азотом, при сжижении гелия — жидким водородом. Достоинства холодильных циклов с дросселированием — их простота и надежность.

Холодильные циклы с детандерами более сложны



в осуществлении, но зато более эффективны и позволяют иметь более низкие давления сжатого газа, чем в циклах с дросселированием. Поэтому в промышленных установках крупной и средней производительности повсеместно применяются циклы с детандерами, а чистое дроссельные циклы используются только в установках небольшой производительности.

Характерной особенностью холодильного цикла, показанного на рис. 8, б, является сочетание двух видов расширения сжатого газа — в детандере и в дроссельном вентиле. Для этого сжатый газ в середине теплообменника делится на две части; основная его часть (М) направляется в детандер, где расширяется и при этом сильно охлаждается. Расширившийся в детандере газ возвращается в теплообменник и используется для охлаждения оставшейся части сжатого газа (1—М), которая по выходе из теплообменника расширяется в дроссельном устройстве и при этом частично сжимается. Сжатый газ собирается в сборнике, откуда сливается в стационарные или транспортные емкости для дальнейшего использования. В настоящее время разработаны схемы, в которых жидкость получается непосредственно в детандерах, и тогда необходимость в дроссельной ступени отпадает.

В ряде случаев холодильные циклы используются не для получения жидкости, а для непосредственного охлаждения какого-либо устройства, например криососов, магнитов и т. д. В этом случае криоагент после расширения прямо подводится к охлаждаемому объекту в паровой или жидкостной фазе; режим работы криогенной установки без вывода жидкости наружу называется рефрижераторным. На практике часто используются и более сложные холодильные циклы, чем приведенные на рис. 8, однако они в той или иной комбинации содержат элементы основных циклов.

#### Сжатие и очистка газа в криогенных установках

Конструкции машин и аппаратов криогенных установок в первую очередь определяются рабочим давлением в них. По этому признаку различают установки высокого, среднего и низкого давления. К установкам высокого давления относятся машины и аппараты, работающие при давлениях порядка 100—200 атм (10—

20 МПа), среднего давления — от 15 до 60 атм (1,5—6 МПа), низкого давления — от ~2,5 до 10 атм (0,25—1 МПа). В установках высокого и среднего давления для сжатия газа применяются преимущественно поршневые компрессоры, в установках низкого давления — турбокомпрессоры. Принципы работы поршневых машин достаточно просты и хорошо известны. Внутри цилиндра (чаще всего металлического) под воздействием создаваемой силы совершает возвратно-поступательное движение поршень. При движении поршня в одну сторону цилиндр через всасывающий клапан заполняется газом; затем всасывающий клапан закрывается и поршень начинает двигаться в обратную сторону, сжимая засосанный газ. В конце хода сжатия открывается нагнетательный клапан и сжатый газ выталкивается из цилиндра.

В турбокомпрессорах сжатие газа производится под действием центробежной силы, создаваемой вращающимся на валу рабочим колесом с лопатками. Сжимаемый газ подводится по оси в центральную часть рабочего колеса и движется между лопатками к его периферии со все возрастающей скоростью. На выходе из рабочего колеса газ поступает в неподвижный диффузор, где за счет уменьшения кинетической энергии продолжается процесс сжатия. Из диффузора газ или направляется в нагнетательную камеру, или подводится к следующему рабочему колесу для дальнейшей сжатия. Степень повышения давления в одной ступени сжатия (колесо плюс диффузор) зависит от окружной скорости колеса, рода газа и его температуры. Допускаемая окружная скорость определяется прочностью материала колеса и, например, для стальных колес, не должна превышать 280—300 м/с. При такой скорости для «тяжелых» газов, таких, как воздух, азот, кислород, степень повышения давления в одной ступени турбокомпрессора составляет 1,2—1,3, а для «легких» (гелий, водород) она существенно меньше.

Для сжатия воздуха в криогенных установках низкого давления применяются обычно турбокомпрессоры с 6—8 ступенями сжатия. Для сжатия до таких же давлений гелия или водорода потребовалось бы рабочих колес в 3—4 раза больше, что и ограничивает создание турбокомпрессоров для сжатия этих газов. Хорошее охлаждение сжимаемого газа особенно важно



для криогенных установок, чтобы, во-первых, не загрязнять газ продуктами разложения масла и, во-вторых, не тратить вырабатываемый в установке холод на охлаждение сжатого газа до комнатной температуры.

Для обеспечения работоспособности криогенных установок сжатый газ должен быть очищен от всех примесей, которые при охлаждении могут затвердеть и забить или загрязнить рабочие поверхности аппаратов. К таким примесям относятся: пары воды и масла, углекислота, примеси воздуха в водороде, примеси азота и водорода в гелии и т. д. В настоящее время для очистки газов в криогенных установках используют адсорбцию и вымораживание вместо ранее применявшихся химических методов. Перерабатываемый газ прежде всего необходимо осушить, т. е. освободить от паров воды, являющихся общей примесью, присутствующей почти во всех газах. Количество влаги, содержащееся в газе, весьма сильно зависит от температуры. Так, например, при полном насыщении влагой в каждом  $1 \text{ м}^3$  воздуха при атмосферном давлении содержится: при температуре  $+30^\circ \text{C} - 30,3 \text{ г}$  воды, при  $0^\circ \text{C} - 4,85 \text{ г}$ , при  $-30^\circ \text{C} - 0,31 \text{ г}$ . С повышением давления содержание влаги в газе уменьшается.

В криогенных установках осушка газов ведется или вымораживанием в перекрывающихся теплообменниках и регенераторах, или адсорбцией при комнатной температуре в адсорберах. В качестве адсорбентов используются силикагель, алюмогель, а в последнее время — синтетические цеолиты, называемые иногда молекулярными ситами. Цеолиты имеют размер пор порядка  $0,3-1,0 \text{ нм}$  ( $10^{-9} \text{ м}$ ) и хорошо задерживают молекулы воды. Степень осушки, даваемая цеолитами, соответствует вымораживанию при  $-100^\circ \text{C}$ . После насыщения адсорбента влагой он должен быть регенерирован, и потому для непрерывного ведения процесса осушки необходимо иметь, как минимум, два адсорбера, работающих попеременно. Регенерация адсорбента для удаления влаги проводится обычно продувкой адсорберов нагретым газом.

Другой весьма распространенной примесью, от которой необходимо избавляться, является углекислота ( $\text{CO}_2$ ). В воздухе содержится в среднем  $0,03\%$  углекислоты, она замерзает при  $-78^\circ \text{C}$  и создает большие

трудности в эксплуатации воздуходелительных установок. Именно забивка аппаратов твердой углекислотой, остающейся в воздухе после очистки, определяет срок непрерывной работы воздушных криогенных установок. Очистка от углекислоты производится вымораживанием или адсорбцией при низких температурах. Очистка вымораживанием ведется в регенераторах или реверсивных теплообменниках и совмещается с осушкой и охлаждением газа. В воздухе после очистки в регенераторах остается около  $15-20$  миллионных долей  $\text{CO}_2$ . Дальнейшая очистка, если это требуется, ведется фильтрацией.

Низкотемпературная адсорбция является наиболее эффективным и универсальным методом очистки и широко применяется как для очистки воздуха от углекислоты, так и для очистки водорода и гелия от примесей воздуха. В качестве адсорбентов используется силикагель, активированные угли и цеолиты. При очистке водорода и гелия от примесей воздуха адсорберы часто охлаждаются жидким азотом. При этом может достигаться очень высокая степень очистки — до остаточного содержания воздуха порядка  $10^{-9}$  долей (одна миллиардная часть) и ниже. Низкотемпературная адсорбционная очистка газа от примесей применяется не только в криогенных установках с целью предотвращения забивки аппаратуры, но и как общий и наиболее распространенный метод получения чистых газов, необходимых для всяких других нужд (например, при производстве полупроводниковых материалов, в химии, светотехнике, метрологии, газовых лазерах и т. д.).

### Теплообменные аппараты криогенных установок

Использование холода расширенного газа для охлаждения потока сжатого газа возможно только с помощью теплообменных аппаратов, поэтому они являются необходимой составной частью всякой криогенной установки. По принципу действия эти аппараты делятся на теплообменники и регенераторы. В теплообменниках холод передается непрерывно и стационарно от одного потока газа к другому через разделяющую их стенку, в то время как в регенераторах теплообмен осуществляется периодически и нестационарно через



заполняющую регенераторы теплоемкую массу — насадку. Через регенератор попеременно пропускается то поток расширенного газа, охлаждающего насадку, то поток сжатого газа, отнимающего холод от насадки. Из-за такой периодичности процесса теплообмена для непрерывной работы криогенной установки нужно иметь по крайней мере два регенератора: в то время как по одному пропускается поток расширенного газа, по другому идет поток сжатого газа.

Периодически (обычно через несколько минут) потоки переключаются с одного регенератора на другой с помощью системы клапанов. Перед каждым переключением необходимо сбросить сжатый газ из регенератора, и эта потеря сжатого газа ограничивает применение регенераторов областью невысоких давлений. При давлениях сжатого газа выше примерно 6 атм (0,6 МПа) потери становятся слишком большими. Преимуществом регенераторов, приводимым к широкому их использованию в крупных воздухоохладительных установках низкого давления, является совмещение охлаждения воздуха с его очисткой от паров воды и углекислоты. При пропускании через регенератор сжатого потока газа содержащаяся в нем влага и углекислота вымерзают на насадке. После переключения потоков задержанные на насадке примеси выносятся из регенератора обратным потоком чистого расширенного газа.

В регенераторах воздухоохладительных установок применяются преимущественно два типа насадки: диски из гофрированной алюминиевой ленты и насыпная каменная насадка из базальта. Каменная насадка, хотя и менее эффективная, чем металлическая, но более дешевая и, кроме того, позволяет размещать внутри рефрижератора трубчатые теплообменники для вывода из установки части продуктов, не загрязненных примесями. Принцип регенераторного охлаждения используется также в криогенных газохолодильных машинах (КГМ).

Теплообменники являются более универсальным аппаратом и применяются в любых криогенных установках. Существует множество конструкций теплообменников, но большинство их принадлежит к двум видам — трубчатым и пластинчатым. На рис. 9 приведены принципиальные схемы теплообменников, наиболее часто применяемые в криогенной технике.

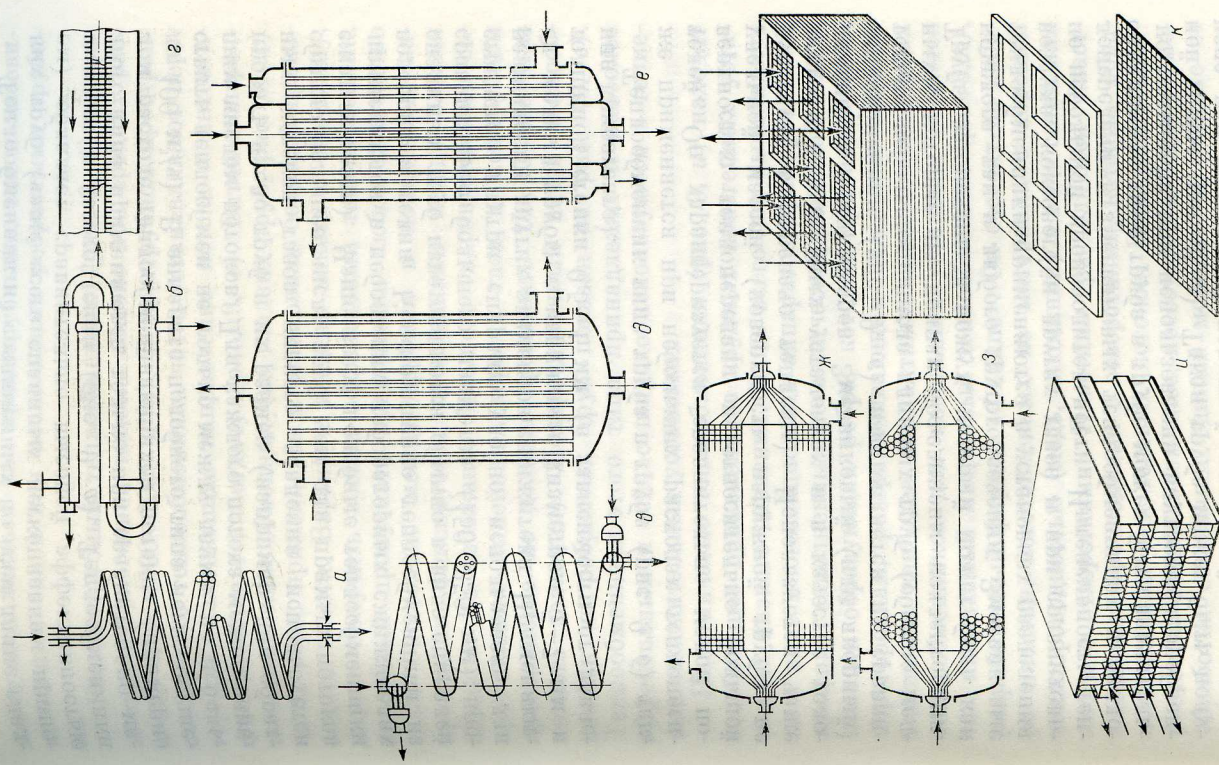


Рис. 9. Схемы криогенных теплообменников



Теплообменник из соединенных по всей длине гладких труб (чаще всего спаянных легкоплавким припоем) обладает сравнительно высокой эффективностью и прост в изготовлении (рис. 9, а). Теплообменники этого типа применяются только при сравнительно малом расходе теплообмениваемых потоков (примерно до 100 м<sup>3</sup>/ч). В аппарате подобного типа легко осуществить теплообмен не только между двумя, но и большим числом потоков. Для каждого потока можно варьировать число труб и их размер (например, для обратных потоков газов низкого давления используются обычно большее число труб, чем для прямых потоков сжатых газов). Чаще всего подобные теплообменники применяются в небольших лабораторных сжижителях водорода и гелия. Конструктивно теплообменники из спаянных труб изготавливаются обычно в виде спиралей сравнительно большого диаметра (150–350 мм); пространство внутри спирали удобно использовать для размещения других элементов сжижителя. Применяются медные трубы с наружным диаметром 5–7 мм и толщиной стенки 0,5–1 мм (в зависимости от давления криоагента).

Теплообменник типа труба в трубе (рис. 9, б) также применяется при небольших расходах теплоносителей. Он характеризуется сравнительно малой поверхностью теплопередачи и относительно большой удельной массой (поверхность наружной трубы не участвует в передаче теплоты). Используется чаще всего в холодильных установках и в качестве холодильников компрессоров. Змеевиковый (или якорный) теплообменник (рис. 9, в) изготавливается из сравнительно небольшого числа длинных труб (обычно медных), которые на концах объединены коллекторами. Трубы заключены в кожух, который может быть как круглого, так и любого другого сечения. Змеевиковые теплообменники применяются в установках разделения воздуха, коксового и других газов и при сравнительно небольшой производительности. Интенсивность теплопередачи в змеевиковых теплообменниках и теплообменниках типа труба в трубе может быть значительно повышена при использовании внутренней обрешечки трубы (рис. 9, г). Такая труба может быть получена как поперечной холодной прокаткой из гладкотрубной заготовки, так и отдельной навивкой ребра, например, из проволоки. Теплообменники этого типа

могут выполняться как прямотрубными, так и змеевиковыми, с одной или несколькими ребристыми трубами.

Кожухотрубный теплообменник (рис. 9, д) применяется в криогенной технике обычно при средних расходах газа (500–3000 м<sup>3</sup>/ч). В межтрубном пространстве такого теплообменника часто устанавливают перегородки, изменяющие направление потока и интенсифицирующие теплоотдачу (рис. 9, е). Витой поперечный теплообменник (из гладких труб, рис. 9, ж) чаще всего применяется в установках большой производительности. Варьируя диаметр пакета и его длину, можно получить весьма эффективный теплообменник, способный пропускать практически любое количество газа. Расстояние между трубами в поперечном направлении фиксируется прокладками между слоями навивки. Во избежание большого гидравлического сопротивления линейная скорость газа в межтрубном пространстве не должна превышать 15–20 м/с (газ низкого давления). Поперечный витой теплообменник из ребристых труб показан на рис. (9, з). Теплообменники этого типа принадлежат к наиболее эффективным и сейчас широко используются в гелиевых сжижительных установках.

Пластинчатые теплообменники (рис. 9, и) находят все большее применение в крупных криогенных установках низкого давления. Чаще всего они выполняются в виде многосекционных аппаратов прямоугольного профиля, заполненных металлической насадкой в виде пластин образующих ребра, которые припаиваются к перегородкам, разграничивающим отдельные каналы. Одним из наиболее компактных видов пластинчатых теплообменников для небольших установок является так называемый матричный теплообменник (рис. 8, к), разработанный фирмой «Филипс». Он состоит из набора пластин, изготовленных из материала с хорошей теплопроводностью (медь, алюминий) в виде сетки или листа с отверстиями. Пластины разделяются пластмассовыми прокладками с отверстиями, которые образуют каналы для газовых потоков. Весь пакет собирается на специальном клее, прессуется и после термообработки составляет единый монолит. В отличие от других видов пластинчатых теплообменников матричный может выдерживать более высокие давления газов в каналах — до 20 атм (2 МПа).



Теплообменные аппараты криогенных установок должны создавать минимальную разность температур между потоками. Эта разность температур (она называется недорекуперацией) определяет часть потерь холода в криогенной установке и влияет на общие энергетические затраты. Поэтому желательно иметь недорекуперацию в теплообменниках воздушных установок не выше  $5^{\circ}\text{C}$ , водородных и гелиевых — порядка  $1-4,5^{\circ}\text{C}$ . Эффективность теплообменников низкотемпературных установок должна быть на уровне  $94-96\%$ , а для газовых холодильных машин — не ниже  $98\%$ .

В качестве основных материалов для изготовления теплообменников криогенных установок используются медь, алюминий, сплавы на их основе, а также нержавеющая сталь. Трубы чаще всего применяются медные, а трубные решетки, в которых они крепятся, — латунные. При изготовлении крупных витых теплообменников навивка труб производится на автоматах с программным управлением.

Расчеты криогенных теплообменников ведутся по общим формулам, принятым в теплотехнике с учетом изменения теплоемкости газов, когда это изменение существенно (обычно при давлениях, близких к критическому). При давлениях, близких к атмосферному, теплоемкость всех газов можно считать независящей от давления.

### Теплоизоляция криогенных установок

Теплоизоляция аппаратов и машин, работающих при низких температурах, необходима для защиты их от притоков тепла из окружающей среды. Чем ниже рабочая температура, тем эффективнее должна быть теплоизоляция, так как с понижением температуры увеличиваются потери холода на компенсацию теплопритоков и резко возрастает стоимость самого термического холода.

Тепло из окружающей среды может передаваться низкотемпературному оборудованию тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и лучеиспусканием. Хорошая теплоизоляция должна сводить к минимуму все эти виды теплопередачи.

Наиболее простым способом теплоизоляции криогенного оборудования является использование плохо

проводящих тепло материалов, а также высокого вакуума. При первом способе аппараты помещаются внутрь кожуха из листового железа, а оставшееся свободное пространство заполняется волокнистым или порошковым (ячеистым) материалом с малым коэффициентом теплопроводности. Насыпной материал предпочтительно использовать при передаче тепла конвекцией, уменьшает частично лучеиспускание, но остается приток тепла за счет теплопроводности самого материала и заполнения его поры газа (воздуха). Материалов, плохо проводящих тепло, довольно много, но выбрать подходящий — дело не простое, особенно когда речь идет о теплоизоляции крупных установок или изделий, выпускаемых большими сериями. Дело в том, что, помимо малого коэффициента теплопроводности, изоляционный материал должен удовлетворять еще и целому ряду других свойств. К таким дополнительным свойствам относятся: небольшой удельный вес (чтобы затраты на охлаждение изоляции были меньше), эластичность (чтобы не было большой усадки и не образовывались пустоты в изоляционном пространстве), небольшая влагопоглощаемость (влага увеличивает теплопроводность материала), химическая инертность, дешевизна и доступность получения, простота обращения. Полная негорючесть обычно не требуется, но трудная стораемость желательна.

Неплохим изоляционным материалом являются шерстяные и шелковые очесы, применявшиеся в криогенике в первой трети нашего века, но сейчас их употребление из-за дороговизны и дефицитности было бы расточительством. В настоящее время для теплоизоляции криогенных установок из насыпных материалов чаще всего применяются: минеральная (шлаковая) вата, стеклянная вата, перлитовый порошок, получаемый обжигом кремнеземистых горных пород, аэрогель кремниевой кислоты, ячеистые материалы — газонаполненные пластмассы и пенопласты (мипора, пенополистирол, пенополиуретан и др.). Ячеистые материалы удобно использовать в виде блоков, которые также могут служить опорами для холодной аппаратуры.

Обычная насыпная изоляция пропитана воздухом и потому годится только для теплоизоляции криогенного оборудования с рабочей температурой выше температуры конденсации воздуха, т. е. выше  $80^{\circ}\text{K}$ . При



более низких температурах насыпную теплоизоляцию необходимо вместо воздуха заполнить газом, который не конденсируется при этих температурах (например, водородом или гелием). Так как водород и гелий обладают более высокой теплопроводностью, чем воздух, то и теплопроводность изоляции, заполненной этими газами, будет выше, что приводит к необходимости увеличения толщины изоляционного слоя по сравнению с обычным. Поэтому для водородных и гелиевых температур насыпная теплоизоляция применяется крайне редко, в особых случаях.

Другим старинным способом теплоизоляции является высокий вакуум. При высоковакуумной теплоизоляции аппараты выполняются двухстенными, с расстоянием между стенками в несколько миллиметров. В этом зазоре создается вакуум порядка  $10^{-3}$  Па ( $10^{-5}$ – $10^{-6}$  мм рт. ст.) с помощью сочетания двух вакуум-насосов: механического и диффузионного. Высший вакуум устраняет передачу тепла конвекцией, но полностью оставляет теплопередачу излучением и в небольшой степени теплопроводностью остаточных газов. Чтобы уменьшить передачу тепла излучением, стенки аппаратов полируют, покрывают тонким слоем серебра или меди (эти материалы хорошо отражают падающее на них излучение), а также устанавливают внутри вакуумного пространства охлаждаемые экраны. Так, в сосудах для долговременного хранения жидкого гелия применяются экраны, охлаждаемые жидким азотом, что снижает приток тепла от излучения наружного воздуха к жидкости примерно в 200 раз. Недостатком высоковакуумной теплоизоляции является трудность создания как самого высокого вакуума (требуется два насоса — механический и диффузионный), так и поддержания его длительное время, особенно в крупных устройствах.

Задача получения высокоэффективной теплоизоляции была решена путем сочетания насыпного материала и вакуума. Такое сочетание привело к созданию двух широко применяемых в современной криогенике видов теплоизоляции: вакуумно-порошковой и многослойной экранно-вакуумной (сокращенно называемой ЭВТИ).

Физическая сущность вакуумно-порошковой изоляции заключается в следующем. Как известно из учебников физики, теплопроводность газов не зависит от

давления до тех пор, пока давление не снижено до величин, при которой длина свободного пробега молекул становится сравнимой с расстоянием между поверхностями, участвующими в теплообмене. При дальнейшем понижении давления теплопроводность газов уменьшается пропорционально давлению. Если заполнить изоляционное пространство легким порошковым порошком с размером пор меньшим, чем средняя длина пробега молекул при атмосферном давлении, то даже сравнительно небольшое уменьшение давления в изоляционном пространстве (до  $10$ – $20$  Па) приводит к существенному снижению общей теплопроводности. Это дает возможность получать с помощью порошков, отнесенных до невысокого вакуума ( $10$ – $20$  Па), теплоизоляцию по эффективности почти такую же, как при высоком вакууме.

Невысокий вакуум, легко получаемый обычным механическим вакуум-насосом, и составляет важное преимущество вакуумно-порошковой теплоизоляции. Лучшими материалами для вакуумно-порошковой изоляции являются аэрогель кремниевой кислоты, мипора, перлит и другие вещества, имеющие поры небольшого размера. Через вакуумно-порошковую изоляцию заметная часть тепла, помимо теплопроводности материала, передается излучением. Для уменьшения излучения в порошок можно добавить некоторое количество бронзовой или алюминиевой пудры, хорошо отражающей излучение, но это повышает стоимость изоляции.

Наиболее эффективным видом теплоизоляции в современном криогенике является экранно-вакуумная (ЭВТИ), представляющая собой набор слоев тонкой алюминиевой фольги или покрытых тонким слоем алюминия полимерных пленок (например, из лавсана), заполняющих отлаченное до высокого вакуума изоляционное пространство. Слои металлической фольги разделяются прокладками из стеклоткани или полимерной сетки, чтобы они не соприкасались, иначе теплопроводность всего пакета возрастет. Такая изоляция хорошо защищает криогенную аппаратуру от всех видов подвода тепла: от конвекции — высоким вакуумом, от излучения — множеством отражающих экранов, от теплопроводности — прокладками из стеклоткани или полимерных сеток.

Многослойная экранно-вакуумная теплоизоляция, будучи относительно дорогой, тем не менее используется



ется все чаще, особенно широко применяется для изоляции резервуаров, предназначенных для перевозки и длительного хранения сжиженных азота, кислорода, водорода и гелия. Следует отметить, что многослойную изоляцию криогеника заимствовала у космической техники, где она применяется для теплоизоляции космических кораблей.

Помимо теплопритоков через изоляцию, к аппаратам криогенных установок поступает также тепло через различные конструктивные детали (трубы, опоры, подвески и т. д.), соединяющие холодные части установок с теплым внешним кожухом. Для уменьшения притока тепла через трубы их выполняют из малотеплопроводных материалов (например, нержавеющей стали или мельхиора), а также увеличивают по возможности их длину и уменьшают толщину стенок. Аппараты небольших размеров подвешивают непосредственно на трубах и вентиллях, более крупные — на цепях из нержавеющей стали. Опоры аппаратов выполняются из дерева, текстолита, стеклопластиков, а также из пакетов тонких металлических пластин с прокладками из малотеплопроводных материалов.

Трудности в создании хорошей защиты от притока тепла из окружающей среды и от менее холодных частей аппаратуры к более холодным растут с понижением температуры. Они особенно велики в области ультранизких температур (ниже 0,3 К), когда полезная холодопроизводительность мала, а допустимые величины теплопритоков должны составлять миллиардные доли ватта. В этих случаях, помимо обычных видов теплопередачи, необходимо учитывать целый ряд дополнительных факторов, как, например, механические колебания машин и самого здания, электромагнитные излучения и др.\*

\* Подробнее о теплоизоляции устройств, работающих при ультранизких температурах, можно прочесть в книге О. Лоунасса [5].

## Глава 6. Криогенные установки на температурный уровень 80 К

Установки этого уровня составляют основу всей криогеники. Помимо производства в крупных масштабах многочисленных продуктов, необходимых в народном хозяйстве, температурный уровень к 80 К является необходимой предварительной ступенью получения водородных и гелиевых температур. На криогенном уровне 80 К работают две крупнейшие отрасли современной техники — разделение воздуха и сжижение природного газа. В этой главе расскажем о назначении и устройстве таких установок.

### Криогенные воздухоразделительные установки (ВРУ)

На воздухоразделительных установках производятся в промышленных масштабах кислород, азот, аргон, неон-гелиевая и криптоно-ксеноновая смеси. Кислород, азот и аргон выпускаются как в газообразном, так и в жидком виде, а из неона-гелиевой и криптоно-ксеноновой смесей в дальнейшем получают чистые неон, криптон и ксенон. Атмосферный воздух является единственным источником сырья для получения всех инертных газов, кроме гелия, который выгоднее получать из природных газов. Потребность народного хозяйства в продуктах разделения воздуха непрерывно растет и потому из года в год увеличивается как количество ВРУ, так и их мощность.

В индустриально развитых странах, таких, как США, СССР, ФРГ, годовое производство кислорода и азота исчисляется миллиардами кубических метров. Крупными потребителями кислорода, азота, аргона и других продуктов разделения воздуха являются черная и цветная металлургия, химическая и нефтехимическая промышленности, энергетика, ракетная техника. Растет их использование в научных исследованиях, медицине, сельском хозяйстве и пищевой промышленности. В настоящее время чугун и сталь практически полностью выплаваются с использованием кислорода. Обогащение доменного дутья кислородом позволяет существенно (на 20–25%) увеличить производительность печей и на 25–30% снизить расход кокса. Ос-



повным способом производства стали становится кон-  
верторный метод с использованием технического кис-  
лорода. Кислород позволяет также интенсифицировать  
процесс выплавки стали в мартеновских и электропечах.  
Кислород паходит также широкое применение при  
выплавке никеля, меди, свинца, резке и зачистке  
металлов, в прокатном производстве. Выплавка титана,  
циркония и ряда специальных легированных сталей  
требует создания инертной среды из чистого аргона.  
Аргон также широко применяется при сварке алюми-  
ния, титана и других цветных металлов. В общем  
металлургия использует больше половины производи-  
мых в стране кислорода, азота и аргона.

Вторым после металлургии крупнейшим потреби-  
телем кислорода и азота является химическая промыш-  
ленность. Кислород требуется при производстве таких  
химических продуктов, как аммиак, азотная кислота,  
метилловый спирт, ацетилен, серная кислота и т. п.  
Азот является важнейшей составной частью азотных  
удобрений и многих других химических продуктов.  
Чистый азот применяется в производстве аммиака, эти-  
лена, полиэтилена, пропилена и других веществ, а в  
качестве защитной среды — в технологии производст-  
ва изопренового каучука.

Крупным потребителем продуктов разделения воз-  
духа является и ракетно-космическая техника. Жид-  
кий кислород сейчас широко используется как окис-  
литель с такими горючими компонентами ракетных  
топлив, как керосин, гидразин и др. Современные моц-  
ные ракеты-носители используют на первой ступени  
жидкий кислород с керосином, а на последующих —  
жидкий кислород с водородом, что позволяет получить  
хорошее отношение полезной нагрузки к общей массе  
ракеты.

Жидкий азот является самым распространенным  
криоагентом, используемым всюду, где требуется ох-  
лаждение от 200 и вплоть до 65 К.

Для разделения воздуха на составляющие части его  
сжижают и подвергают ректификации. Большинство  
ВРУ работает по следующей общей схеме. Атмосфер-  
ный воздух сжимается, очищается от примесей воды и  
углекислоты, охлаждается и расширяется для произ-  
водства холода, после чего поступает в ректифика-  
ционные колонны для разделения. Рабочие технологи-  
ческие схемы ВРУ, а также устройство необходимых

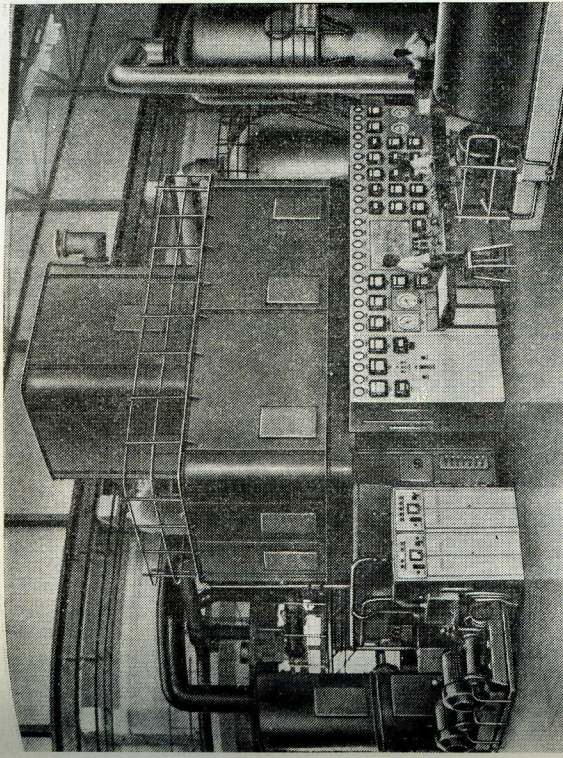


рис. 10. Общий вид современной крупной воздухо-разделительной  
установки (ВРУ)

машин и аппаратов весьма разнообразны и зависят в  
первую очередь от применяемого холодильного цикла,  
назначения установки и ее производительности.

Современные ВРУ для получения газообразных  
кислорода и азота с производительностью по перера-  
батываемому воздуху более  $6000 \text{ м}^3/\text{ч}$  выполняются,  
как правило, по технологической схеме низкого давле-  
ния с турбодетандером, предложенной в свое время  
академиком П. Л. Капицей. Особенностью схемы  
низкого давления является тот факт, что воздух сжи-  
мается турбокомпрессором до 6 атм (0,6 МПа), очи-  
щается и охлаждается в регенераторах, а расширяется  
для производства холода в высокоэффективных турбо-  
детандерах. На рис. 10 показан общий вид одной из  
крупных воздухо-разделительных установок.

Производительность современных ВРУ достигает  
громадных величин: в час перерабатываются многие  
десятки тысяч кубических метров воздуха. Целый ряд  
крупных ВРУ перерабатывает по 180 тыс.  $\text{м}^3$  и более  
воздуха в час. Схема ВРУ низкого давления допускает  
получение на них продуктов разделения воздуха как в



газообразном, так и одновременно в жидком виде в количествах до  $\sim 10\%$  производительности по газообразному продукту.

При производстве жидких азота и кислорода из установок выводится большое количество холода, и потому холодопроизводительность жидкостных ВРУ и расход энергии в них на единицу продукта выше, чем газовых. Так, в крупных газовых ВРУ расчетный удельный расход энергии составляет  $\sim 0,4-0,5$  кВт $\cdot$ ч/м<sup>3</sup> газа, в жидкостных —  $1,1-1,3$  кВт $\cdot$ ч/кг жидкостности.

В установках, специально предназначенных для получения жидких продуктов разделения воздуха, используются преимущественно холодильные циклы среднего давления (2,0—5,0 МПа) или схема «компаунд» с потоком воздуха среднего давления и азотным холодильным циклом низкого давления. Энергетические показатели ВРУ для производства жидких продуктов разделения воздуха зависят не только от максимального давления холодильного цикла, но в значительной мере — от числа ступеней охлаждения. Использование турбодетандеров на разных температурных уровнях и предварительного фреонового охлаждения дает заметное снижение удельных затрат энергии на производимый продукт, хотя и приводит к усложнению установки.

Современная техника располагает большим выбором машин для сжатия газов, различных по принципу действия, производительности, создаваемому давлению и конструкции отдельных узлов. Также велико и разнообразие конструкций теплообменной и очистной аппаратуры. Поэтому ВРУ весьма сильно отличаются друг от друга устройством узлов сжатия, очистки, охлаждения и расширения. Что же касается узлов разделения сжиженного воздуха, то по принципу работы они почти одинаковы для всех ВРУ и отличаются в основном только размерами. Применяемый в современных установках метод разделения называется ректификацией и заимствован криогеникой из спиртовой промышленности. Разделение воздуха основано на различии в температурах кипения составляющих его веществ. Под атмосферным давлением кипение жидкого азота происходит при температуре на  $13^\circ\text{C}$  ниже, чем жидкого кислорода, и на  $10^\circ\text{C}$  ниже, чем жидкого аргона. Благодаря этому при одной и той же темпера-

туре компоненты жидкого воздуха — азот, кислород и др. — имеют различную упругость своих паров, а при равновесии между паровой и жидкой фазами концентрация легколетучего компонента (например, азота) в паре будет выше концентрации его в жидкости. Используя различные концентрации компонентов в паре и в жидкости, их можно разделить на чистые вещества методом ректификации.

Процесс ректификации заключается в установлении физико-химического равновесия между фазами путем изменения их состава и температуры при непрерывном контакте фаз. Процесс ректификации осуществляется в аппаратах колонного типа, в которых жидкость и пар движутся противотоком, обеспечивая необходимый для массо- и теплообмена контакт двух фаз. При этом происходит непрерывное обогащение поднимающегося по колонне пара легкокипящим компонентом разделяемой смеси (в нашем случае азотом), а стекающей жидкости — высококипящим компонентом (в нашем случае кислородом).

Так как процессы массообмена и теплообмена происходят на границе между фазами, важно создать в ректификационных аппаратах максимальную поверхность контакта фаз. Для этого по всей высоте ректификационной колонны через определенные интервалы устанавливаются перфорированные диски, называемые тарелками, на которых через слой текущей жидкости пропускается (пробульвует) пар. Наиболее распространены тарелки ситчатого либо колпачкового типа.

Для разделения жидкого воздуха чаще всего применяются двухколонные ректификационные аппараты, устройство которых схематично показано на рис. 11. Аппарат состоит из ректификационной колонны высокого давления 1 (нижней) и расположенной над ней колонны низкого давления 2 (верхней). Между колоннами помещен конденсатор-испаритель 3, в трубах которого конденсируются пары азота, поднимающегося из нижней колонны, а в межтрубном пространстве кипит жидкий кислород, стекающий из верхней колонны. Именно для осуществления процесса конденсации азота за счет кипения кислорода давление в нижней колонне повышено до  $\sim 0,5$  МПа, в то время как в верхней оно близко к атмосферному ( $\sim 0,1$  МПа).

Процесс разделения воздуха в двухколонном аппарате протекает следующим образом. Сжатый воздух,



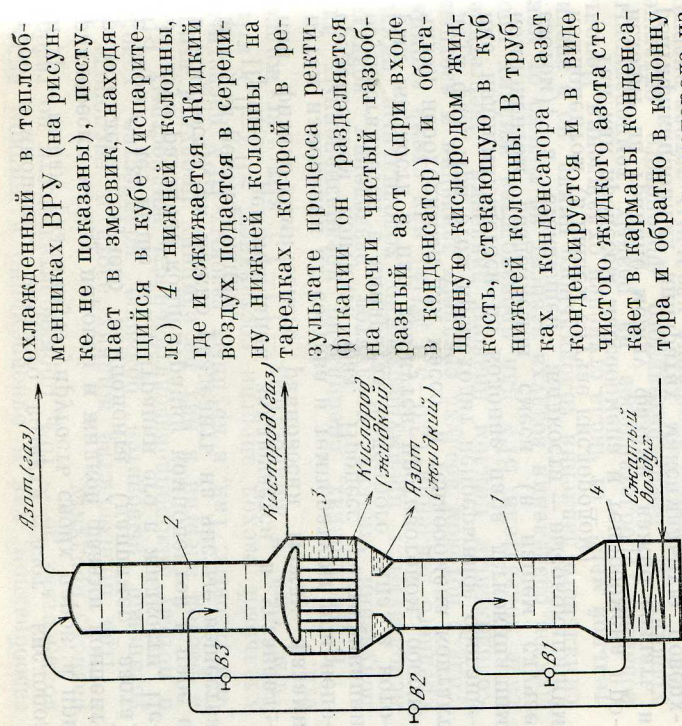


Рис. 11. Двухколончатый ректификационный аппарат (В1, В2, В3 — вентили управления)

45%  $O_2$ , из куба нижней колонны дросселируется в седловину верхней колонны (куда также поступает холодный воздух после расширения в турбодетандере). На верх колонны подается чистый жидкий азот из карманов конденсатора для отмывки кислорода из поступающего в колонну воздуха. В результате процесса ректификации на тарелках верхней колонны в конденсатор стекает чистый жидкий кислород, а из верхней части колонны отводится почти чистый газообразный азот.

Таким образом, в двухколонном аппарате из воздуха по желанию можно получить кислород и азот или в газообразном, или в жидком виде. Как продукт жидкий азот отводится из карманов конденсатора, а жидкий кислород — из межтрубного пространства конденсатора.

В современных ВРУ, чтобы уменьшить общую вы-

соту блока разделения, ректификационные колонны часто располагают не друг над другом, а рядом. Что касается конструктивного устройства элементов ректификационных колонн, на которых происходит процесс разделения, то, как уже говорилось, чаще всего используются ситчатые или колпачковые тарелки. На установках небольшой производительности, где обычно не требуется высокая чистота вырабатываемых продуктов разделения, колонны иногда засыпают кольцами Рашига (отрезки труб по длине равные их диаметру) или другими деталями с развитой поверхностью. Это дешевле, чем установка ситчатых или колпачковых тарелок.

В последнее время для покрытия холодопотерь, а также сжижения продуктов разделения в установках стали использовать также криогенные холодильно-газовые машины.

### Криогенное производство инертных газов

Инертные газы — аргон, гелий, неон, криптон и ксенон — занимают весьма заметное, иногда незаменимое место среди веществ, используемых в современной науке и технике. Потребности в инертных газах увеличиваются из года в год, и это стимулирует быстрый рост их производства. Опишем наиболее существенные области использования инертных газов.

Аргон широко применяется в качестве защитной инертной среды в машиностроении — при автогенной обработке металлов (сварке и резке); в металлургии — при выплавке специальных сталей, алюминия и титана; в полупроводниковой промышленности — для выращивания кристаллов кремния, титаната бария и др.; в лазерной технике — как рабочая среда газовых лазеров; в энергетике — в качестве рабочего тела МГД-генераторов; в ядерной технике — для жидкостных ионизационных камер; в светотехнике — для флуоресцентных ламп, разрядных трубок, ламп накаливания. Цвет свечения аргона — синеголубой.

Криптон и ксенон используются в электровакуумной и светотехнике для заполнения в лампах накаливания газосветных трубок, в ядерной физике — для заполнения пузырьковых камер, в медицине — как наркотическое средство, а также в рентгенокопировании. Криптон светится чисто белым цветом.



Неон является очень перспективным криогенным агентом, призванным заменить взрывоопасный водород в холодильных устройствах в температурном диапазоне 20–30 К. Неон применяется также в радиоэлектронике и светотехнике, для создания газовых лазеров, газосветовых и сигнальных ламп (например, для маяков). Цвет свечения неона — красный.

Особое значение в науке и технике приобрел гелий. Он является главным криогенным агентом физики низких температур, позволяющим получать температуры, близкие к абсолютному нулю. С помощью жидкого гелия обеспечивается работоспособность всех крупных сверхпроводящих устройств. В ракетной технике и космонавтике гелий используется для перекачивания топлива и создания дыхательных смесей, в ядерной технике — для охлаждения реакторов, в химии — для хроматографии. Уникальные свойства гелия (легкость, инертность, большая теплопроводность и теплоемкость) делают его идеальным теплоносителем будущих ядерных энергоблоков и лучшим рабочим телом для воздушноплавания. О необычайных свойствах жидкого гелия, отличающих его от обычных жидкостей, было рассказано выше (см. гл. 4).

Универсальным и неисчерпаемым источником получения всех инертных газов является атмосферный воздух. Для неона, криптона и ксенона воздух является единственным источником получения, а для аргона — главным. Для получения гелия основным сырьем сейчас являются природные газы, а воздух — только вспомогательным. Помимо 78% азота и 21% кислорода в воздухе содержится значительное количество аргона (0,93%) и небольшие количества (менее тысячных долей процента) других инертных газов. Так, в каждой тысяче кубических метров атмосферного воздуха имеется примерно 18 л неона, 5 л гелия, 1 л криптона и только 0,08 л ксенона.

Все инертные газы, кроме гелия, экономически наиболее выгодно получать как побочные продукты при криогенном производстве кислорода и азота на воздухо-разделительных установках. Технология получения инертных газов из воздуха состоит из двух стадий: получение первичного концентрата, называемого сырым газом, и выделение чистых компонентов из полученного первичного концентрата. Аппараты первой стадии входят в состав блока разделения воздуха,

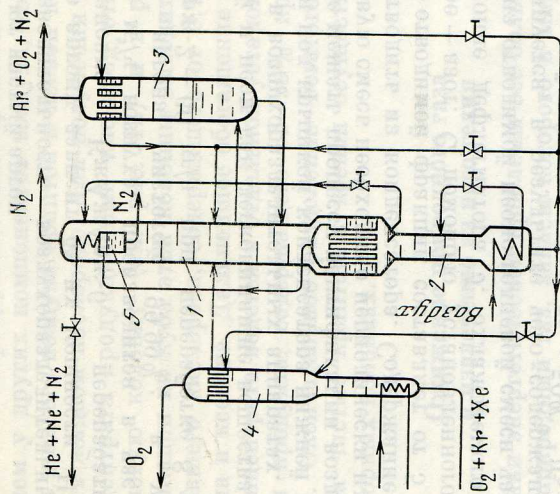


Рис. 12. Принципиальная схема выделения инертных газов из воздуха на крупных ВРУ

аппараты второй стадии составляют самостоятельные установки.

Принципиальная схема первой стадии — получения первичных концентратов инертных газов на воздухо-разделительных установках — представлена на рис. 12.

К основным колоннам 1, 2 ректификации воздуха (они описаны выше) дополнительно подключаются еще две колонны: аргоновая 3 — для получения сырого аргона, криптоновая 4 — для получения криптоно-ксенонового концентрата. Температура кипения жидкого аргона находится между точками кипения азота и кислорода (примерно на 10° выше кипения азота и на 3° ниже кипения кислорода), и поэтому аргон будет накапливаться в нижней части верхней воздухо-разделительной колонны. Отсюда отбирается тройная азото-кислородо-аргонная смесь, содержащая 5–12% аргона, и направляется для дальнейшей переработки в аргоновую колонну. В результате процесса ректификации сверху аргоновой колонны отводится сырой аргон, содержащий 80–95% аргона, 3–10% азо-



та, остальное — кислород. После очистки от кислорода в отдельной установке из сырого аргона удаляют азот и получают чистый аргон.

Производительность воздухооделительных установок по аргону зависит от их мощности. Например, в установке КЖАЖАрг-6, перерабатывающей 22 тыс. м<sup>3</sup>/ч воздуха, производится в час 290 кг жидкого аргона чистотой 99,99%; в установке АЖКЖАрг-2 — 60 кг/ч при переработке 8 тыс. м<sup>3</sup>/ч воздуха.

Гелий и неон как легкокипящие вещества не сжижаются в воздухооделительных аппаратах, а накапливаются под крышкой конденсатора нижней колонны. Чтобы не мешать процессу ректификации воздуха, неон-гелиевую смесь необходимо периодически или непрерывно отводить из конденсатора. Содержание неона и гелия в отводимой фракции составляет от 5 до 15%, остальное — азот. С помощью установленного в верхней колонне дефлегматора 5, охлаждаемого жидким азотом, из отводимой неон-гелиевой смеси часть азота конденсируется, в результате чего содержание неона и гелия в ней увеличивается до ~50%. Дальнейшее увеличение концентрации неон-гелиевой смеси до ~90—95% производится конденсацией азота — с помощью жидкого азота, кипящего под вакуумом. Очистка смеси от остатков азота и получение чистого неона достигается чаще всего адсорбцией на активированном угле при азотных температурах.

Гелий, содержащийся в неон-гелиевой смеси, покалучаемой на воздухооделительных аппаратах, покапромышленностью не используется, так как значительно выгоднее получать гелий из природных газов. Однако в будущем при истощении гелиеносных природных газов воздух может стать основным источником гелия, тем более что общее количество его в атмосфере Земли оценивается цифрой более 3,5 млрд т. Это количество практически не будет изменяться, поскольку весь теряемый гелий возвращается в атмосферу.

Содержание криптона и ксенона в воздухе меньше, чем других инертных газов, хотя общие их запасы в атмосфере измеряются миллиардами тонн. Небольшие объемные концентрации криптона и ксенона в воздухе осложняют их получение. Так, для получения 1 м<sup>3</sup> криптона необходимо переработать около 1 млн м<sup>3</sup> воздуха, а для получения 1 м<sup>3</sup> ксенона — в 14 раз

больше. Поэтому для получения криптона и ксенона используются только очень крупные ВРУ.

Так как температура кипения криптона и ксенона выше, чем у других компонентов воздуха, то при разделении жидкого воздуха криптон и ксенон концентрируются в жидком кислороде. Для получения первичного концентрата продукционный кислород отводится в криптоновую колонну (см. рис. 12) и в результате ректификации из куба этой колонны выводится ~10% поступившего кислорода, содержащего от 0,1 до 0,2% криптона и ксенона. Дальнейшее обогащение этого бедного концентрата ведется в отдельной установке до получения продукта, содержащего 85—90% криптона и ксенона. Окончательное разделение богатого концентрата на чистые криптон и ксенон осуществляется в лабораторных колонках.

### Ожижение природного газа и извлечение из него гелия

В решении энергетической проблемы все большую роль играет природный газ, запасы которого в мире весьма значительны. Состоя в основном из метана, природный газ является прекрасным универсальным топливом с хорошими экологическими показателями. Трудности использования природных газов заключаются в относительной дороговизне доставки их потребителям, обычно расположенным далеко от месторождений. Большие запасы природного газа обладают США, СССР (главным образом в Сибири), некоторые страны Азии и Африки (Алжир, Ливия, Индонезия и др.), в то время как половина потребителей, помимо СССР и США, находится в Европе и Японии.

Передача газа по трубопроводам или перевозка его в сжатом виде в сосудах высокого давления обходится слишком дорого. Наилучшее экономическое решение проблемы в настоящее время заключается в сжижении природного газа в районе месторождения и доставке его потребителям в жидком виде специальными танкерами — метановозами. При сжижении природного газа объем его сокращается в 600 раз, что резко снижает транспортные расходы. Поэтому производство сжиженного природного газа (СПГ) за последние десятилетия стремительно росло и сейчас достигает более 40 млрд м<sup>3</sup> в год. В настоящее время доля СПГ в об-



щем газопотреблении составляет в Японии 85%, США — 22%, Западной Европе — 23%. Япония импортирует в виде СНГ около 20 млрд м³ газа в год, используя для этого танкеры вместимостью до 120 тыс. м³.

Сжиженный природный газ кипит под атмосферным давлением при температуре 115 К и сжижение его ведется криогенными методами.

Для сжижения газа в странах-экспортерах построены крупные заводы, а у потребителей соответственно станции газификации или разлива. В последнее время за рубежом СНГ начинает использоваться непосредственно как моторное топливо для двигателей внутреннего сгорания автомобилей, тепловозов, морских судов и вертолетов.

Технологические схемы ожижения природного газа не отличаются от общепринятых в криогенной технике при сжижении воздуха. Широко используются циклы с детандерами и циркуляцией как чистого азота, так и в смеси с метаном. Зачастую применяется каскадное включение нескольких детандеров, расположенных на различных температурных уровнях, что снижает затраты энергии на сжижение.

Большое распространение получил так называемый однопоточный каскадный цикл с одним компрессором, сжимающим многокомпонентную смесь газов с различными температурами кипения (например, пропан—этилен—метан). Эта смесь, циркулирующая в замкнутом холодильном цикле с детандерами, охлаждает и сжижает основной поток природного газа, протекающий по соответствующим каналам теплообменника. Расход энергии в крупных промышленных установках сжижения природного газа составляет примерно 300—500 кВт·ч/т.

В природном газе часто содержится гелий. Обычно его содержание невелико (0,1—0,3%), но изредка встречаются, главным образом в США, природные газы с содержанием гелия до 2%. Природные газы, содержащие более 0,4% гелия, называются богатыми. К сжиганию, в СССР таких газов пока не найдено.

Гелиеносные природные газы являются главным источником получения гелия, а не воздуха, так как стоимость извлечения гелия из воздуха в 10—30 раз выше, чем из природных газов даже с содержанием 0,4% He. Криогенный процесс получения гелия из природных

газов основан на большой разнице в температурах конденсации гелия и остальных компонентов смеси. При охлаждении природного газа происходит сжижение всех сопутствующих гелию компонентов, а гелий остается в газообразном состоянии.

Выделение гелия из природных газов на современных установках производится в две стадии. Сначала с помощью соответствующего холодильного цикла из природного газа сжижается основная масса метана и азота с получением сырого гелия, содержащего 50—75% He. Из этого концентрата во второй стадии после сжатия его и охлаждения жидким азотом выделяют чистый гелий, содержащий 97—98% He. Окончательный продукт высокой чистоты (до 99,95% He) получают адсорбцией, пропуская чистый гелий через охлаждаемый до 80 К активированный уголь. Мировое производство гелия исчисляется сотнями миллионов кубометров в год.

В США гелий считается стратегическим сырьем и действует программа консервации гелия, для чего были построены заводы по получению сырого гелия с содержанием гелия 50—70%, который закачивают в подземные хранилища, откуда по мере необходимости он поступает на выработку чистого продукта. Крупные заводы по извлечению гелия имеют в США производительность по готовому продукту (сырой гелий с концентрацией в 65%) более 160 тыс. м³/сут. Коммерческая цена газообразного гелия довольно высока и составляет у нас, в зависимости от чистоты, 5—10 руб. за кубометр.

## Глава 7. Криогенные установки на температурный уровень 20 К

Наиболее характерными представителями установок, работающих в этой области температур, являются: сжижители водорода и неона, системы получения дейтерия методом ректификации жидкого водорода, жидководородные пузырьковые камеры для ядерных исследований, а также различные виды криогенных газовых машин (КГМ), вырабатывающих холод на температурном уровне 30—15 К,



Для получения холода на уровне 20 К применяются те же физические принципы, что и в установках на температурный уровень 80 К, т. е. расширение сжатого газа тремя описанными выше способами — дроселированием, детандированием или методом вихлопа. Однако в техническом осуществлении холодильные циклы на уровне 20 К существенно отличаются от циклов на 80 К.

Прежде всего следует отметить, что простым дроселированием сжатого газа с комнатной температуры охладить такие вещества, как водород, неон и гелий, вообще не удается. Связано это с тем, что инверсионные температуры Джоуль—Томсоновского эффекта этих газов лежат существенно ниже температуры окружающей среды. Так, инверсионная температура для неона равна 230 К, водорода — 205, гелия — 45 К. Поэтому водород и неон при простом дроселировании будут не охлаждаться, а наоборот, нагреваться. Охлаждение и сжижение этих газов методом дроселирования возможно, только если сжатый газ перед дроселированием будет охлажден посторонним хладагентом заметно ниже температуры инверсии. Для водорода и неона это охлаждение производится жидким азотом (до 80–90 К), для гелия — жидким водородом (до ~17–20 К). Охлаждение водорода, неона и гелия с комнатной температуры может достигаться их расширением в детандерах.

Другая особенность установок на температурную область порядка 20 К заключается в методах теплоизоляции их холодных частей.

Аппараты и машины криогенных установок с рабочей температурой ниже 70 К нельзя теплоизолировать насыпными или волокнистыми материалами, пропитанными воздухом, как это делается в криогенных установках на 80 К и выше. При температурах ниже 70 К воздух, пропитывающий теплоизоляционный материал, может начать сжижаться и замерзать, что приведет к потере материала теплоизоляционных свойств. Для предотвращения этого теплоизоляционный материал должен или пропитываться неконденсирующимся газом (например, водородом либо гелием), или же находиться под вакуумом. Поэтому в криогенных установках на температурный уровень ниже 70 К чаще всего применяется вакуумно-порошковая или многослойная экранно-вакуумная теплоизоляция. Годится и тепло-

изоляция только высоким вакуумом, но она менее удобна в эксплуатации.

### Сжижение водорода и неона

В температурной области вблизи 20 К имеются только два жидких криогента — жидкий водород с температурой кипения 20,4 К и жидкий неон, кипящий при 27 К. Сжижение и хранение жидкого водорода имеет свои особенности, отличающие его от иных криогенных жидкостей — азота, гелия, неона и др.

Молекулы водорода могут находиться в двух состояниях атомов, называемых орто и пара (направляющимися друг от друга ядерными спинами (направлениями механических моментов протонов)). Молекулы параводорода имеют антипараллельную ориентацию ядерных спинов, молекулы орто-водорода — параллельную ориентацию. Орто- и пара-молекулы заметно отличаются по своим физическим свойствам (давлению насыщенных паров, теплопроводности и др.), так что обычный водород можно фактически рассматривать как смесь двух газов. Равновесная концентрация орто- и пара-молекул в водороде зависит от температуры. При комнатной температуре водород состоит из 25% пара- и 75% орто-молекул. С понижением температуры орто-молекулы начинают переходить в пара-молекулы, так что в жидком состоянии (при 20 К) равновесие соответствует почти 100%-ному содержанию пара-молекул. Переход орто-молекул в пара-молекулы сопровождается выделением значительного количества тепла (~500 кДж/кг, т. е. больше теплоты испарения жидкого водорода). Поэтому, если получаемый жидкий водород предназначен для длительного хранения, необходимо в процессе сжижения провести орто-пара-конверсию, чтобы в сливаемом жидком водороде было более 95% пара-молекул. Для этого внутри ожижителя устанавливаются специальные конверторы с катализатором. В качестве катализаторов используют гидроокиси железа, хрома и марганца, а также хромоникелевые катализаторы.

Следует подчеркнуть еще одну, не очень приятную, особенность процесса сжижения водорода. Если в исходном газе имеются примеси кислорода, то они в процессе сжижения будут вымерзать и накапливаться в жидком водороде. Кристаллы твердого кислорода в



жидком водороде являются взрывоопасными, и потому сжижаемый водород должен быть тщательно очищен от примеси кислорода и приняты меры, предотвращающие попадание атмосферного воздуха в жидкий водород.

Схемы и конструкции узлов водородо-ожижительных установок зависят от их производительности. В установках лабораторного типа, имеющих обычно производительность до 100–200 л/ч, применяется холодильный цикл дросселирования с предварительным охлаждением сжатого водорода жидким азотом. Для повышения холодопроизводительности цикла температуру предварительного охлаждения стремятся сделать мало понизить, для чего жидкий азот заставляют кипеть под пониженным давлением. Откачивая жидкий азот до 0,02–0,025 МПа (0,2–0,25 атм), температуру его кипения понижают до 66–67 К, что существенно повышает коэффициент сжижения водорода. Давление сжатого водорода обычно равно 13–15 МПа (130–150 атм).

На рис. 13 показана типовая схема водородо-ожижительной установки для научно-исследовательских учреждений. Водород для сжижения доставляется обычно с электролитных заводов в стандартных стальных баллонах 1 и очищается от паров воды и примесей воздуха в блоке адсорбционной очистки 2. Чистый водород хранится в газгольдере 3. После сжатия в компрессоре 4 до 12–15 МПа он проходит окончательную очистку от примесей кислорода в блоке 5 и поступает в ожижитель 6. В ожижителе сжатый водород последовательно охлаждается в предварительном теплообменнике ( $T_1$ ), ванне с жидким азотом (А), основном теплообменнике ( $T_2$ ) и дросселируется до давления 0,15 МПа. Сжижившаяся часть накапливается в сборнике (Сб), откуда периодически сливается, а нежизвиший газ через теплообменники  $T_2$  и  $T_1$  возвращается на всас компрессора. Необходимый для предварительного охлаждения жидкий азот доставляется в сосудах 7, заливается в азотную ванну, где кипит под вакуумом, создаваемым насосом 8.

Сжижение водорода в крупных масштабах ведется на промышленных установках, имеющих производительность в десятки тысяч литров в час. На промышленных установках производится обычно жидкий параводород, чтобы снизить потери при хранении. Для по-

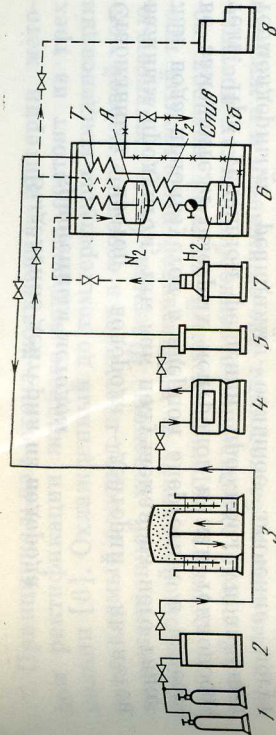


рис. 13. Схема водородо-ожижительной установки небольшой производительности

вышения энергетической эффективности в крупных установках для сжатия газа используются турбокомпрессоры, а для расширения — турбодетандеры. По-всеместно используется жидкий азот для предварительного охлаждения. Испаряющийся при хранении водород из резервуаров возвращается в установку на повторное сжижение.

Следует отметить, что для экономического получения больших количеств жидкого водорода существенное значение имеет стоимость исходного сырья — газообразного водорода. Представляется перспективным сочетание получения крупных количеств жидкого водорода с извлечением из него дейтерия.

Наилучшим хладагентом в области температур 20–30 К является жидкий неон, обладающий значительно большей теплотой испарения, чем жидкий водород (в 3,3 раза в расчете на литр), и к тому же химически инертный и взрывобезопасный. Схемы сжижения неона полностью аналогичны схемам сжижения водорода. Так как температура инверсии Джоуль–Томсоновского эффекта у неона выше, чем у водорода, то в циклах с дросселированием коэффициент сжижения неона будет высоким, достигающий значений в 30–35%. И хотя сейчас неон примерно в 100 раз дороже водорода, цена на него по мере увеличения производства будет снижаться и приближаться к стоимости гелия. Понижение цены на неон будет стимулировать расширение его использования в криогенике.



Стабильный изотоп водорода — дейтерий является важным продуктом, так как получаемая из него тяжелая вода используется в ядерной энергетике в качестве замедлителя быстрых нейтронов и как теплоноситель. При успешном решении проблемы управления термоядерными реакциями большое значение могут приобрести реакторы, работающие на чистом дейтерии. Несмотря на относительно малое содержание дейтерия в обычном водороде (одно ядро дейтерия на 6000 ядер обычного водорода), общее количество дейтерия на нашей планете очень велико. По подсчетам академика И. В. Курчатова, 1 л обычной воды по энергии равноценен ~400 л нефти, и поэтому дейтерия как топлива хватит землям на сотни миллионов лет.

Для атомной электростанции средней мощности требуется 150—250 т тяжелой воды, и чтобы АЭС с тяжелой водой были конкурентноспособны с тепловыми электростанциями, тяжелая вода должна быть дешевой.

Эффективным методом извлечения дейтерия из водорода и водородсодержащих соединений является метод ректификации жидкого водорода. Другие методы получения тяжелой воды в промышленном масштабе — электролиз воды, изотопный обмен и т. д. — являются более дорогими как по расходу энергии, так и по капитальным затратам на строительство заводов. Расход электроэнергии на получение 1 кг  $D_2O$  методом ректификации жидкого водорода составляет 4—5 тыс. кВт·ч, в то время как при изотопном обмене водород-вода он достигает 100 тыс. кВт·ч/кг. Трудность технологической задачи извлечения дейтерия из водорода заключается в его малом содержании в исходном сырье: 1 часть на 6000—7000 частей водорода.

Метод получения дейтерия из жидкого водорода основан на разной температуре кипения водорода и дейтерия. Под атмосферным давлением дейтерий кипит при 23,5 К, а водород при 20,4 К. Разница составляет 3,12°. Фактически она меньше, так как при малых концентрациях в водороде присутствуют в основном молекулы HD, а не  $D_2$ , и задача ректификации сводится к разделению смеси нормального водорода, состоящего из 75% орто-молекул и 25% пара-молекул и HD.

Принципиальная схема получения дейтерия методом ректификации жидкого водорода состоит из трех колонн [6]. Охлажденный до температуры конденсации разделяемый водород поступает в середину первой ректификационной колонны. Флегмой (т. е. жидкостью, орошающей колонну и отмывающей выделяемый продукт) служит циркуляционный сжатый водород, который после охлаждения в теплообменниках поступает в змеевик куба колонны, где сжимается и в жидком виде подается на верх первой колонны. Этот циркуляционный водород одновременно используется в выбранном холодильном цикле для покрытия всех потерь холода (на разделение, в окружающую среду и т. д.). Из куба первой колонны отводится концентрат, содержащий 5—10% HD, и направляется во вторую колонну, где происходит его концентрация почти до 100% HD. Отводимая из куба второй колонны чистая фракция HD нагревается в теплообменнике до температуры, необходимой для проведения реакции  $2 HD \rightleftharpoons H_2 + D_2$ . По выходе из реактора смесь содержит примерно 50% HD, 25%  $D_2$  и 25%  $H_2$ . Эту тройную смесь через теплообменник направляют в третью ректификационную колонну для выделения конечного продукта (~100%  $D_2$ ). Выходящий из верха третьей колонны газ, содержащий молекулы HD, перекачивают во вторую колонну для его извлечения. Так же поступают и с верхним продуктом второй колонны, перекачиваемым для извлечения содержащегося в нем HD в первую колонну. Для превращения полученного 100%-ного  $D_2$  в тяжелую воду его сжигают.

В промышленном масштабе процесс получения дейтерия методом ректификации жидкого водорода впервые был осуществлен в СССР [6]. Кстати, это был первый в мире промышленный процесс при температуре 20 К. До этого промышленных установок с рабочей температурой ниже 70 К не существовало. Доклад советских специалистов об этом способе получения дейтерия на 2-й Международной конференции по атомной энергии в Женеве в 1958 г. вызвал подлинную сенсацию. Работа была удостоена Ленинской премии в 1960 г.



Пузырьковые камеры являются одним из основных приборов, используемых в ядерных исследованиях. Без пузырьковых камер сейчас не может обходиться ни один крупный ускоритель частиц. Пропуская через камеру, помещенную в магнитное поле, пучок частиц из ускорителя, получают треки частиц в виде цепочек пузырьков, которые фотографируются. По радиусу кривизны трека, магнитной индукции и заряду частицы можно определить ее импульс.

Наиболее распространенными веществами для заполнения камер являются пропан, жидкий водород и др. Особенно удобен жидкий водород, имеющий простой состав и позволяющий поэтому легко анализировать результаты ядерных реакций, проходящих на протонах — ядрах водорода. Для изучения ядерных реакций на нейтронах водородные камеры заполняют дейтерием.

Для получения треков частиц жидкость камеры должна быть в метастабильном состоянии, которое получают посредством системы изменения давления. Для изменения давления над жидкостью применяют два типа устройств — поршневое и сильфонное. Для возможности фотографирования треков частиц камеры снабжаются стеклянными окнами, герметичное уплотнение которых в металлическом корпусе камеры представляет довольно трудную задачу, поскольку стекло и металл камеры имеют различные коэффициенты линейного расширения (сжатия). Небольшие стекла уплотняют обычно с помощью ромбических медных прокладок, для крупных стекол применяют надувные уплотнения. Помимо механизма расширения жидкости, камеры должны иметь систему термостатирования, которая должна поддерживать заданную температуру жидкости с точностью 0,01—0,05 К.

Современные пузырьковые камеры достигают весьма больших размеров. Так, в Институте высоких энергий (СССР) работает созданная во Франции 4,5-метровая камера «Мирабель», в ЦЕРН используется так называемая Большая европейская водородная камера (BEBC) диаметром 3,7 м. Большинство действующих камер имеет традиционную для криогенных устройств высоковакуумную систему теплоизоляции. Все крупные пузырьковые камеры снабжаются своими водород-

ными ожигателями-рефрижераторами, расположенными обычно рядом с камерой. Испаряющийся из камеры холодный водород возвращается в ожигатель для последующего сжигания.

Современная тенденция в развитии жидководородных камер\* заключается в переходе на многометровые камеры (отказ от камер небольших размеров) и применении для создания магнитного поля сверхпроводящих магнитов. Использование таких магнитов позволяет существенно снизить расход энергии и работать с относительно высокой магнитной индукцией.

## Глава 8. Криогенные установки на температурный уровень 4 К

В этой области температур холод могут производить только гелиевые установки, так как все другие вещества, кроме гелия, затвердевают. Водород становится твердым при температуре  $\sim 13$  К, а все другие газы переходят в твердое состояние при еще более высоких температурах. Гелий же под давлением собственных паров остается в жидком состоянии вплоть до абсолютного нуля. Криогенные установки температурного уровня 4 К предназначены, как правило, для получения и использования жидкого гелия как в нормальном, так и сверхтекучем состоянии (см. гл. 4).

Большие количества жидкого гелия сейчас требуются для охлаждения крупных сверхпроводящих магнитов, применяемых в ускорителях ядерной физики, МГД-генераторах, установках термоядерного синтеза, для сверхпроводящих линий электропередач, мощных электрогенераторов со сверхпроводящими обмотками и ряда других задач.

Для удовлетворения современных потребностей гелиевые криогенные установки выпускаются промышленностью двух типов: чисто гелиевые ожигатели со сливом жидкого гелия на сторону и гелиевые рефрижераторные установки, производящие холод на температурном уровне 2—5 К и часто непосредственно соединенные с охлаждаемыми крупными объектами. При

\* Подробнее об устройстве жидководородных пузырьковых камер можно узнать из книги «Криогенные приборы и устройства в ядерной физике» [7].



этом для охлаждения используется не только теплота испарения жидкого гелия, но и холод паров гелия. Работоспособность больших сверхпроводящих систем, камер имитации космоса и других крупных объектов обеспечивается именно рефрижераторными установками, вырабатывающими гелиевый холод в больших количествах — сотни и тысячи ватт в час. Зачастую установки этого типа могут работать на двух режимах — ожигительном и рефрижераторном. Большинство рефрижераторных установок строится для работы на температурном уровне 4,5 К, но имеются установки и на 1,8 К. Удельные затраты электроэнергии на получение холода на уровне 4 К в рефрижераторных установках составляют 500—1000 Вт/Вт.

Более подробно оба вида гелиевых установок описаны ниже.

### Сжижение гелия

Как уже упоминалось выше, гелий — самый трудно сжижаемый газ, кипящий при атмосферном давлении всего лишь на  $4^\circ$  выше абсолютного нуля температур. Из-за низкой температуры кипения и весьма малой теплоты испарения хранить его в жидком виде продолжительное время очень трудно. За 80 лет, прошедшие со времени его первого сжижения Камерлинг-Оннесом, жидкий гелий стал главным хладагентом физики низких температур, производительность установок для его сжижения с нескольких литров в час увеличилась в сотни раз, а сами ожигители выпускаются теперь серийно многими промышленными фирмами во всех промышленно развитых странах.

Для сжижения гелия используются в первую очередь холодильные циклы с дросселированием или детандированием, описанные выше. Однако практическая реализация их в случае гелия более сложная, чем для сжижения других газов. Из-за низкой инверсионной температуры Джоуль-Томсоновского эффекта гелия (она лежит в районе  $\sim 40$  К) и незначительных межмолекулярных сил сжижение гелия методом дросселирования возможно только при предварительном охлаждении сжатого гелия до  $\sim 15$ —18 К. Из посторонних хладагентов для такого охлаждения подходит только жидкий водород, кипящий под вакуумом, что и было применено Камерлинг-Оннесом при первом ожигении

гелия в 1908 г. Перманентное применение водорода под вакуумом нежелательно из-за его взрывоопасности в случае подсоса воздуха.

В 1934 г. академик П. Л. Капица предложил и практически осуществил гелиевый ожигитель с детандером, позволившим отказать от применения жидкого водорода. Схема П. Л. Капицы, используемая сейчас в большинстве современных гелиевых ожигителей, показана на рис. 14.

Сжатый в компрессоре 1 гелий после предварительного охлаждения жидким азотом 2 делится на две части: примерно  $\frac{2}{3}$  его расширяется в детандере 3, а оставшаяся  $\frac{1}{3}$ , охлажденная газом, выходящим из детандера, подводится к дросселируемому вентилю 4. После дросселирования часть гелия (8—10% от подаваемого компрессором) сжижается, накапливается в сборнике и сливается в транспортный сосуд. Газообразный гелий после расширения в детандере и дросселировании вентиле отдает свой холод в теплообменниках и, нагревшись примерно до комнатной температуры, вновь поступает на сжатие в компрессор. Выводимый из цикла жидкий гелий компенсируется добавкой на вход в компрессор соответствующего количества газа.

Наибольшие технические трудности в изготовлении гелиевого детандера связаны с созданием уплотнения поршня в цилиндре, которое должно работать при весьма низкой температуре ( $\sim 15$  К), когда все известные смазочные вещества замерзают. Зазор же между порш-

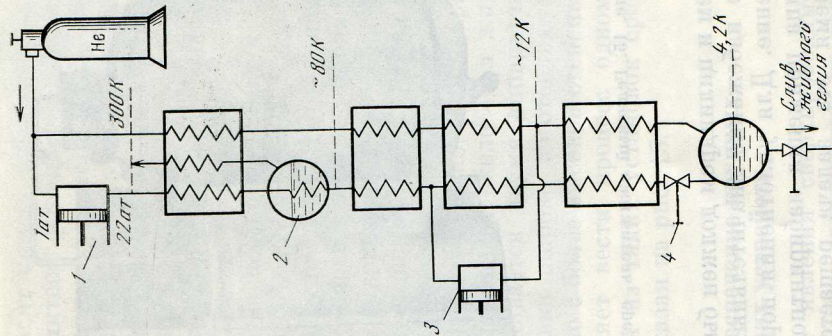


Рис. 14. Схема установки ожигения гелия по П. Л. Капице



чины педорекуперации зависят потери дорогого гелиевого холода. Поэтому для интенсификации теплообмена часто используют оребренные и пластинчатые теплопередающие поверхности, а педорекуперация при водородных и гелиевых температурах не должна превышать  $0,5 \div 1,0$  градуса.

Ожижители гелия выпускаются промышленностью с широким интервалом производительности: от небольших установок производительностью  $5-25$  л/ч до крупных ожижителей, вырабатывающих многие десятки и сотни литров жидкого гелия в час. Расход энергии на сжижение гелия в установках средней производительности  $2-2,5$  кВт·ч/л, а в крупных — еще ниже.

В СССР для научно-исследовательских лабораторий часто применяется гелиево-ожижительная установка типа КГУ 150/4,5, работающая по схеме, приведенной на рис. 14. Она производит около 40 л жидкого гелия в час и обслуживается двумя аппаратами. Аналогичные установки широко изготавливаются и зарубежными фирмами, но с более высокой степенью автоматизации, что позволяет вести процесс одному человеку. Общий вид одной из таких установок средней производительности показан на рис. 15.

### Криогенное обеспечение крупных сверхпроводящих устройств

Техническое использование явления сверхпроводимости, как уже указывалось выше, стало одним из важнейших и перспективных направлений современного научно-технического прогресса. Преимущество сверхпроводящих магнитных систем особенно сказывается при необходимости иметь поля с индукцией, превышающей индукцию насыщения железа. Замена обычных электромагнитов с железным ярмом на сверхпроводящие магниты сулит экономии в расходе электроэнергии в  $10-100$  раз при тех же примерном капитальных затратах. Применение сильных магнитных полей является в настоящее время наиболее эффективным, а иногда и единственным методом решения целого ряда актуальных проблем науки и техники. К таким проблемам в первую очередь относятся:

— удержание горячей плазмы в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу (например, в установках типа «Токамак»);

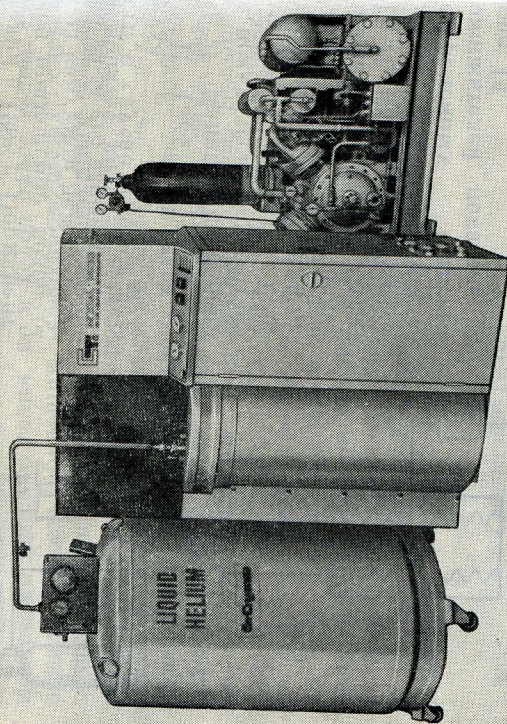


Рис. 15. Гелиевый ожижитель средней производительности

нем и цилиндром должен быть небольшим ( $20-40$  мм) во избежание значительных утечек газа через уплотнение. Для уплотнения поршня в цилиндре П. Л. Капица применил лабиринтное уплотнение. В последнее время эта задача решается нанесением на поршень слоя специальной пластмассы, не теряющей свои уплотняющие свойства при низких температурах.

Используя несколько детандеров, можно отказаться от предварительного охлаждения сжатого гелия жидким азотом, т. е. сжижать гелий вообще без посторонних хладоагентов. В гелиевых ожижителях большой производительности целесообразно применять детандеры турбинного типа, как это делается в крупных воздухоохлаждающих и водородо-ожижительных установках. В последние годы разработаны детандеры, в которых непосредственно получается жидкий гелий, что значительно повышает степень сжижения по сравнению с обычными детандерами. Помимо детандеров, важным узлом всех ожижителей газов являются теплообменники. Задачей этих аппаратов является передача тепла между сжатыми и расширенными потоками газа с минимальным температурным напором, ибо от вели-



— создание крупных магнитных систем в физике высоких энергий (ускорители элементарных частиц, детекторы, пузырьковые камеры и т. д.);

— создание МГД-генераторов для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Это позволит повысить КПД тепловых электростанций приблизительно на 30%.

— создание мощных электрогенераторов постоянного и переменного тока со сверхпроводящими обмотками, что даст увеличение КПД машин и сокращение их массы и габаритов;

— создание различных высокоэффективных электротехнических устройств: накопителей электроэнергии, трансформаторов и т. п.;

— создание сверхпроводящих линий электропередач, дающих существенное снижение потери передаваемой энергии (потери при передаче и распределении электроэнергии составляют сейчас более половины ее стоимости);

— создание наземного транспорта на магнитной подушке со скоростью движения до 500 км/ч.

Решение ряда перечисленных проблем требует охлаждать магниты громадной массы. Так, например, масса сверхпроводящей магнитной системы установки «Токамак-15» составляет 300 т, МГД-генератора на 500 МВт — 2000 т, для проектируемого одного из крупнейших в мире ускорителей элементарных частиц на 3000 ТэВ с длиной кольца 21 км общая масса сверхпроводящих магнитов достигает 12 тыс. т. Охлаждаемые массы магнитов больших пузырьковых камер, работающие уже много лет, достигают 100–360 т и т. д.

Создание систем криогенного обеспечения сверхпроводящих систем такой массы и объема относится к новейшим направлениям современной прикладной криогенной техники. Хотя в 1988 г. были найдены материалы, переходящие в сверхпроводящее состояние при температуре жидкого азота (см. гл. 4), но для технических применений они пока еще не отработаны, и поэтому все современные сверхпроводящие системы, как действующие, так и проектируемые, используют материалы, требующие охлаждения до гелиевых температур.

Охлаждение крупных сверхпроводящих магнитных систем производится обычно циркуляцией жидкого гелия или же погружением магнита в криостат с жид-

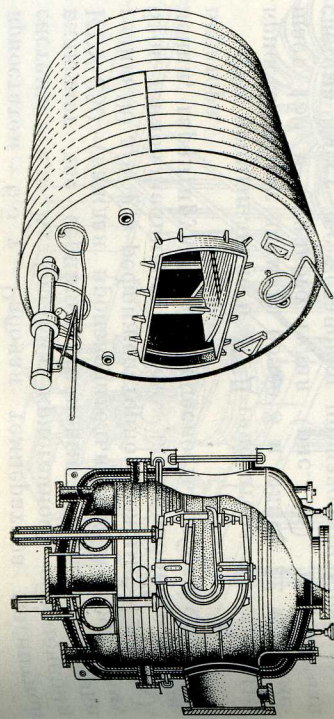


рис. 16. Криостат для сверхпроводящего магнита, погруженного в жидкий гелий

рис. 17. Цилиндрический гелиевый криостат для МГД-генератора

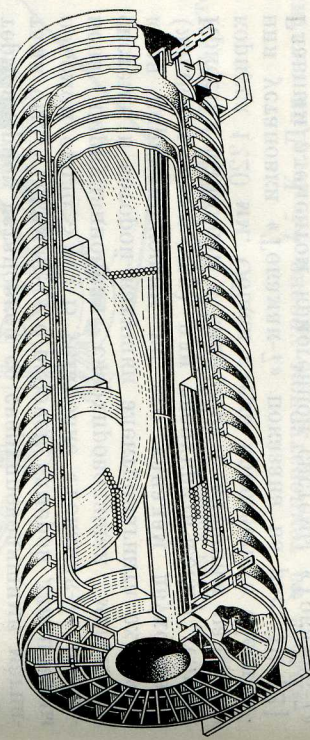


рис. 18. Криостат для промышленного МГД-генератора

ким гелием. В качестве примера погружной магнитной системы на рис. 16 показан криостат установки ЛИН-5Б с электромагнитом для ионной ловушки типа «бейсбол», предназначенной для исследования управляемых термоядерных реакций [2]. Рабочий объем криостата — 6 м<sup>3</sup>, масса сверхпроводящего магнита — 700 кг, рабочая температура — 4,2–6,0 К, общая масса криостата с магнитной ловушкой — 6 т.

На рис. 17 приведен общий вид цилиндрического гелиевого криостата со встроенным сверхпроводящим магнитом для МГД-генератора ИМ-114 [2]. В центре криостата проходит горизонтальный рабочий МГД-канал. Рабочий объем криостата, заливаемого гелием, — 1,6 м<sup>3</sup>, масса магнита — 4,5 т, а вместе с



криостатом — 6,5 т. Рабочая температура магнитной системы — 4,5 К. Система криогенного обеспечения включает две серийные гелиевые установки марки КГУ-250 (каждая производителностью по жидкому гелию 90 л/ч, а в рефрижераторном режиме — 250 Вт), блок теплообменников, систему дистанционного управления, гарантирующую безопасность работы МГД-генератора.

Для промышленного МГД-генератора на 500 МВт криостат имеет диаметр более 8 м, длину 22 м и вмещает 150 м<sup>3</sup> жидкого гелия (рис. 18). Криогенная система имеет две установки производителностью по 400 л/ч жидкого гелия, управление и контроль осуществляются автоматически, время непрерывной работы приблизительно 10 тыс. ч и ресурс более 10 лет.

Сложную задачу представляет собой охлаждение магнитов термоядерных установок. Первой в мире термоядерной установкой со сверхпроводящими магнитами был «Токамак-7» с рабочей камерой для плазмы объемом около 3 м<sup>3</sup>. В установке «Токамак-7» применена циркуляционная сверхпроводящая магнитная система, в которой катушки электромагнита охлаждаются циркулирующим по его каналам двухфазным (жидкость плюс пар) или сверхкритическим гелием. Криостат выполнен в виде тора с внешним радиусом корпуса 1220 мм. Общая схема криогенного обеспечения установки «Токамак-7» показана на рис. 19 [2]. Главным элементом криогенной системы «Токамак-7» является многорежимный гелиевый ожигитель — рефрижератор, специально для нее созданный. Производительность по жидкому гелию — 250 л/ч.

Ожигитель-рефрижератор работает по холодно-тепловому циклу среднего давления (2,5 МПа) с предварительным охлаждением потока сжатого гелия жидким азотом, имеет две детандерные, а также дроссельную и эжекторную ступени охлаждения. Это позволяет осуществлять быструю перестройку режимов работы в ходе экспериментов на «Токамаке-7».

В процессе изготовления находится более крупная термоядерная установка «Токамак-15», имеющая тороидальную камеру с внешним радиусом около 4 м. Криогенная система для «Токамак-15» в ожигительном режиме может сжигать более 420 л/ч жидкого гелия, а в так называемом смешанном технологическом режиме производит 300 л/ч жидкого гелия и 1800 Вт

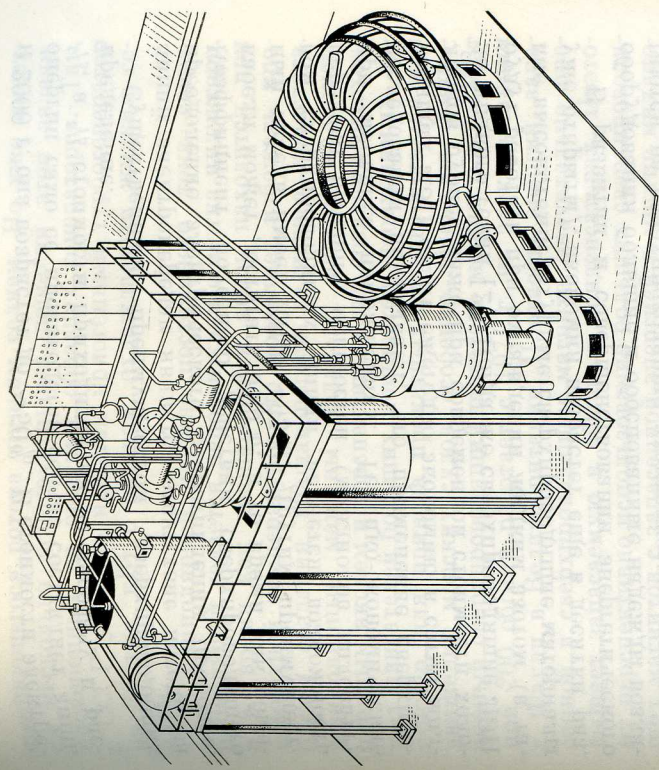


Рис. 19. Схема криогенного обеспечения термоядерной установки «Токамак-7»

холода на температурном уровне 4,5 К. Для сжатия гелия в установке применены винтовые компрессоры, а для производства основного количества холода — гелиевые турбодетандеры. В состав криогенного оборудования входит специальная азотная установка, дающая до 3100 кг/ч жидкого азота и имеющая систему обратной конденсации испарившегося азота, что исключает потери жидкого азота.

К числу весьма перспективных направлений технического использования сверхпроводимости относится и создание сверхпроводящих линий электропередач (СП ЛЭП). Как известно, рост населения, развитие техники и подъем общего уровня жизни ведут к непрерывному увеличению потребности в энергии. Ожидается, что к 2000 г. потребность в энергии возрастет в 2—2,5 раза по сравнению с началом 80-х годов. В общем потреблении энергии доля электроэнергии в настоящее время составляет около 30 % и, как ожидается,



к 2000 г. она возрастет до  $\sim 50\%$ . В стоимости электроэнергии само ее производство сейчас составляет лишь  $1/3$ , а  $2/3$  стоимости приходится на ее передачу и распределение.

Существенным преимуществом сверхпроводящих линий электропередач является отсутствие потерь на преодоление электрического сопротивления проводов. Коэффициент полезного действия сверхпроводящего кабеля может достигать  $99,5\%$ , в то время как обычный кабель имеет КПД  $\sim 95\%$ . Другим преимуществом сверхпроводящих линий является возможность передачи больших мощностей (миллионов киловатт) при меньших напряжениях. Технико-экономические исследования показывают, что применение сверхпроводящих ЛЭП сулит ежегодно экономию в сотни миллионов рублей даже при современной стоимости холода жидкого гелия [2]. Когда же сверхпроводящие ЛЭП будут работать при охлаждении жидким азотом (а такие высокотемпературные сверхпроводящие материалы уже открыты), экономия возрастет еще в десятки раз.

В развитии и совершенствовании энергетического оборудования большие и обоснованные надежды возлагаются на сверхпроводящие электрические машины и накопители энергии.

Современные электрические машины в традиционном исполнении почти исчерпали свои возможности по увеличению коэффициента полезного действия их мощности отдельного агрегата, так как габариты и масса достигли предельных разумных величин. Именно в двигателях большого размера наиболее очевидно проявляются преимущества использования сверхпроводимости. В энергогенераторах со сверхпроводящими обмотками индукция магнитного поля может быть увеличена почти вдвое с одновременным исключением потерь на возбуждение. Это позволяет снизить общую массу турбогенератора приблизительно в 3 раза и вдвое уменьшить его длину при небольшом увеличении диаметра. Сейчас предельная мощность обычных четырехполусных турбогенераторов равна 1600 мВт, а сверхпроводящих может достигать  $\sim 5000$  мВт и коэффициент полезного действия —  $99,5-99,8\%$ .

В синхронных генераторах переменного тока в первую очередь сверхпроводящей делается обмотка возбуждения, обычно размещаемая в роторе. При этом возникает достаточно сложная задача охлаждения

вращающегося ротора жидким гелием. Но уже имеется несколько конструктивных решений этой задачи, проверенных на опытных образцах генераторов. Так, в СССР успешно испытан криогенный турбогенератор на 20 тыс. кВт с ротором, охлаждаемым жидким гелием.

В униполярной машине постоянного тока сверхпроводящей делается неподвижная обмотка индуктора, в то время как вращающийся якорь находится при комнатной температуре. Это позволяет избежать проблемы создания вращающегося гелиевого криостата. Униполярные машины обладают легким малоинерционным якорем и перспективны для создания тихоходных двигателей больших мощностей, необходимых, например, для привода прокатных станов, а также для движения морских судов, особенно ледоколов. Униполярный сверхпроводящий двигатель мощностью 2,4 МВт при 200 об/мин работает с 1971 г. на электростанции г. Фаули в Великобритании. Плотность энергии, запасенной в сверхпроводящем магните, значительно превышает запасаемую в обычных конденсаторах. Поэтому перспективно использование больших сверхпроводящих магнитов с запасенной энергией в многие миллионы Джоулей для сглаживания изменений суточного потребления энергии в крупных энергосистемах. Такие магниты-накопители энергии предлагаются разместить глубоко под землей, используя скальные породы для удержания огромных магнитомеханических сил, возникающих в обмотке.

Сверхпроводящие магниты, способные создавать сильное магнитное поле при малых затратах энергии и относительно небольшом весе, могут помочь и в решении проблемы скоростного транспорта. Идея создания экипажа на магнитной подушке не нова, ей больше полувека. Но интерес к ней возродился в последние десятилетия в связи с развитием технических применений сверхпроводимости. Работы по созданию транспортных средств на магнитной подушке с использованием сверхпроводящих магнитов ведутся в целом ряде стран, и особенно интенсивно в Японии. В конце 70-х годов в Японии на опытном вагоне с магнитной подушкой был установлен мировой рекорд скорости —  $577$  км/ч. Колеса вагона, которые нужны только при малых скоростях, не касаются колеи; при большой скорости вагон парит на магнитной подушке и приво-



дится в движение бегущей волной магнитного поля. Вагон движется плавно, бесшумно.

В общем случае устойчивое парение тел над магнитом не достигается, в чем легко убедиться, если попытаться «заставить парить» один постоянный магнит над другим. Устойчивость магнитной подвески достигается за счет введения в систему диамагнитного элемента. В магнитной подвеске японского поезда достаточный диамагнетизм создается вихревыми токами, которые наводятся в медных витках, размещенных в колее. Подъемная сила создается в результате взаимодействия этих вихревых токов со сверхпроводящими магнитами, расположенными в поезде. В вагоне нет движущихся частей, могущих изнашиваться и производить шум, полет его плавно и безопасен, несмотря на большие скорости. Транспорт на магнитной подушке, создаваемой сверхпроводящими магнитами, является в настоящее время одним из наиболее перспективных направлений для получения сверхвысоких скоростей на поверхности земли.

Особенность всех крупных сверхпроводящих систем состоит в том, что в них во время работы запасается большая магнитная энергия — тысячи МДж. Чтобы обеспечить безопасность работы, необходимо иметь устройства, позволяющие быстро эвакуировать эту запасенную энергию в случае аварийных ситуаций. Такая ситуация создается, например, при локальном перегреве магнитной обмотки, что может вызвать переход ее из сверхпроводящего в нормальное состояние с выделением накопленной магнитной энергии. Это обычно приводит к бурному испарению жидкого гелия, резкому повышению давления в криостате и даже его разрыву. Для предотвращения таких аварий крупные сверхпроводящие магниты обязательно должны иметь системы электрической защиты, предохраняющие от спонтанного перехода сверхпроводящей обмотки в нормальное состояние и повышение давления в криостате сверх допустимого. Ввиду специфичности устройств электрической защиты сверхпроводящих магнитов они здесь не рассматриваются; для защиты же от повышения давления в криостате в случае бурного испарения жидкого гелия используются обычные предохранительные клапаны и мембраны.

## Глава 9. Криогенные газовые машины

В последнем десятилетии для получения криогенных температур в самых различных отраслях техники все чаще используются так называемые криогенные газовые машины (КГМ). КГМ представляют собой автономные рефрижераторы, подобные хорошо известным домашним холодильникам и морозильникам. Но в отличие от бытовых холодильников, поддерживающих внутри холодильной камеры температуры от  $-5$  до  $-20^{\circ}\text{C}$ , криогенно-газовые машины вырабатывают холод на температурном уровне от  $\sim 80$  и до  $\sim 10$  К. Для выработки холода в КГМ используются различные способы расширения сжатого газа, чаще всего расширения в детандере или в процессе выхлопа.

В качестве рабочего газа в КГМ обычно используется чистый гелий, хотя в ряде случаев пригоден и более дешевый водород. Теплообмен между сжатым и расширенным потоками газа внутри машины осуществляется с помощью регенераторов со специальной насадкой (например, из тонкой свинцовой сетки, мелких шариков и др.). Сам процесс теплообмена осуществляется потому, что в регенераторы попеременно поступает то холодный поток газа после расширения, который охлаждает насадку, то сжатый газ перед расширением, который забирает холод от насадки.

Криогенно-газовые машины стали входить в практику с середины 50-х годов, после того как в 1954 г. голландская фирма «Филипс» создала КГМ для сжижения воздуха. Машина фирмы «Филипс», ставшая в те годы технической сенсацией, работает по циклу Стерлинга (предложенному еще в 1816 г.) и удачно сочетается в одном агрегате поршневой компрессор, поршневой детандер и регенератор-теплообменник. Теплота сжатия рабочего газа отводится охлаждающей водой. Чтобы уберечь от притоков тепла из окружающей среды холодные части машины (детандер, регенераторы и др.), их заключают в теплоизоляционный кожух (рис. 20). Жидкий воздух получается путем его конденсации на внешней оребренной стороне цилиндра детандера. Сочетая КГМ с ректификационной колонной для разделения воздуха на его компоненты, можно получить компактную установку для производства жидкого азота.



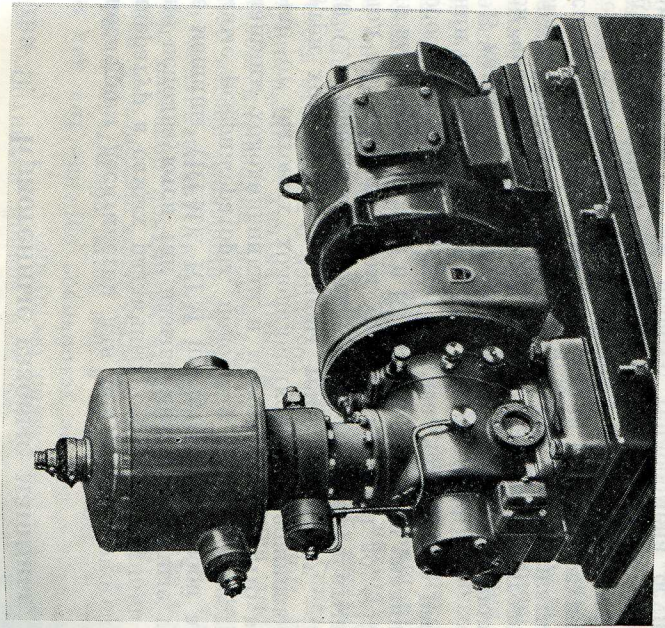


Рис. 20. Криогенно-газовая машина для сжижения воздуха фирмы «Филипс»

В СССР выпускаются КГМ по циклу Стирлинга холодопроизводительностью в 1,1 и 10 кВт при 77 К. Это позволяет при использовании их с дополнительной ректификационной колонной получать соответственно 10 и 65 л жидкого азота в час. Расход энергии на получение жидкого азота с использованием КГМ составляет 4,5–4,7 кВт·ч/л.

Одноступенчатые КГМ обычно обеспечивают рабочие температуры в 70–80 К (рекордные – до 40 К). Для получения температур порядка 15–20 К применяют двух- и трехступенчатые КГМ. На них можно сжижать водород и неон. Так, фирма «Филипс» и НПО «Гелиймаш» (СССР) серийно выпускают сжижители водорода с двухступенчатой криогенно-газовой машиной производительностью 5 л/ч нормального водорода. Мощность двигателя у таких сжижителей 40–12 кВт, время непрерывной работы до 100 ч. В послед-

ние годы появились на основе КГМ сжижители водорода и азота и большей производительности.

Непосредственно сжижать гелий на КГМ не удается, так как сам принцип работы КГМ не позволяет получать температуры ниже 7–8 К, а гелий начинает сжижаться при 5,26 К. Однако КГМ можно применить для предварительного охлаждения сжатого гелия в схемах с дросселированием. Такие сжижители гелия с двумя двухступенчатыми КГМ, имеющими ступени охлаждения в 150, 65, 30 и 15 К, стала выпускать в последнее время также фирма «Филипс». Следует отметить, что благодаря своей компактности холодильно-газовые машины получают все более широкое распространение в микрокриогенной технике, но не как сжижители газов, а как средство криостатирования различных радиотехнических и других объектов при температурах 80–75 и 20–15 К (подробнее о криогенных газовых машинах см. [8]).

## Глава 10. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей

Как мы уже знаем, почти все низкотемпературные исследования и значительная часть технических применений криогеники основаны на использовании так называемых криогенных жидкостей получаемых путем сжижения газов, имеющих низкую температуру кипения. К таким газам относятся азот, водород, гелий, кислород, метан, неон.

Производство криогенных жидкостей относится к числу сложных технологических процессов, требует специальных машин и аппаратов, значительных площадей и высококвалифицированного обслуживающего персонала. Экономически и технически целесообразно вести получение криогенных жидкостей на крупных установках большой производительности с длительным циклом непрерывной работы. Чем больше масштаб производства, тем ниже себестоимость получаемых криогенных жидкостей. Потребности же потребителей в криогентах колеблются в широких пределах от десятков до сотен и более литров в день, причем они неравномерны по времени. По этим причинам большинство потребителей за редким исключением удобнее



и выгоднее покупать криогенные жидкости у крупных производителей, чем организовывать их собственное производство. Работа на привозных криогенных жидкостях особенно выгодна для многочисленных научных, исследовательских и медицинских учреждений, использующих их периодически и в сравнительно небольших количествах. Для таких потребителей в некоторых районах у нас и за границей входит в практику централизованная развозка жидкого азота — наиболее широко используемого криоагента.

Отсюда становится понятным, что в основные задачи криогеники входит не только сжижение низкотемпературных газов, но также хранение полученных криогенных жидкостей и доставка их к местам потребления. Проблемы хранения и транспорта криогенных средств тесно связаны друг с другом, хотя каждая имеет свои особенности.

### Хранение криогенных жидкостей

Из-за низкой температуры кипения и сравнительно небольшой теплоты испарения хранения криогенных жидкостей в течение продолжительного времени является непростой технической задачей. Попробуйте сохранить на горячей плите кастрюлю с непрерывно кипящей водой в течение даже нескольких часов, и вы поймете трудность этой задачи. Криогенные же жидкости требуются сохранять неделями и месяцами, а в некоторых случаях и годами.

Особенно трудна для решения проблема длительного хранения жидкого гелия, имеющего температуру кипения всего на 4 градуса выше абсолютного нуля и крайне малую величину теплоты испарения. Сколь мала теплота испарения гелия, видно из следующего примера: миниатюрная электрическая лампочка мощностью 2 Вт испаряет за час около 3 л жидкого гелия. Чтобы сохранить криогенные жидкости нужное время, сосуды для них должны быть очень хорошо теплоизолированы. Главным препятствием на пути создания эффективной теплоизоляции являются общие физические процессы передачи тепла, такие, как теплопроводность, конвекция и излучение.

Наиболее простыми способами теплоизоляции являются применение плохопроводящих тепло материалов, а также высокого вакуума. Резервуар с криоген-

ной жидкостью помещают внутри герметически плотного наружного корпуса, а образовавшееся между ними пространство заполняют теплоизолирующим материалом или откачивают до высокого вакуума.

В качестве теплоизолирующих материалов для сосудов и резервуаров используются те же материалы, что и идут на теплоизоляцию криогенных установок, а именно: аэрогель кремниевой кислоты, перлитовый порошок, мипора и др. Теплоизоляция с помощью различных волоконистых и пористообразных материалов, будучи относительно дешевой, в сосудах небольшого и среднего объема не является достаточно эффективной из-за теплопроводности самого материала и наполняющего изоляционное пространство воздуха. Поэтому такая изоляция применяется только в крупных резервуарах для жидкого кислорода и азота емкостью в сотни и тысячи кубических метров. Для жидкого гелия и водорода такая изоляция вообще непригодна, так как заполняющий изоляционный материал воздух будет при гелиевых и водородных температурах конденсироваться и замерзать. Несколько лучшие результаты дает высоковакуумная теплоизоляция, пригодная для всех криогенных жидкостей. Сосуды с высоковакуумной теплоизоляцией часто называют сосудами Дьюара, и одной из их разновидностей являются хорошо известные всем бытовые термосы для сохранения горячего чая, кофе и других продуктов. Высоковокумная теплоизоляция хорошо защищает хранимую криогенную жидкость от притоков тепла за счет конвекции и теплопроводности, но не защищает от теплоты излучения наружного корпуса, находящегося при комнатной температуре. Наилучшая теплоизоляция получается комбинацией легкого малотеплопроводного материала с вакуумом (о чем уже говорилось выше). Поэтому в современных сосудах для хранения криогенных жидкостей наиболее полное распространение получили вакуумно-порошковая теплоизоляция и многослойная экранно-вакуумная (ЭВТИ), причем последняя постепенно вытесняет все другие.

По конструктивному устройству выпускаемые промышленностью сосуды делятся на два класса: сосуды для жидких азота, кислорода и аргона и сосуды для жидких водорода, гелия и неона. Основой для такого деления является большая разница в температурах кипения жидкостей, входящих в эти две группы. Жид-



кости первой группы кипят при температуре выше затвердевания атмосферного воздуха, второй — ниже.

На рис. 21 показана схема устройства и внешний вид азотных сосудов небольшого объема (5–100 л), широко используемых в различных отраслях науки и техники. Сосуды двухстенные. Внутренний сосуд подвешен в кожухе на горловине из тонкостенной пержающей стали. Теплоизоляция — вакуумно-многослойная. Во время эксплуатации сосуда выключают вакуум поддерживается адсорбционным поглотителем. Заполнение сосудов сжиженным газом производится из транспортных и стационарных емкостей, а опорожнение ведется путем переворачивания сосуда вверх дном или выдавливанием жидкости газом под избыточным давлением до 0,03 МПа (0,3 кгс/см<sup>2</sup>) с помощью специальных приспособлений.

Более сложно устроены сосуды для жидкого гелия. Конструктивная схема и общий вид серийно выпускаемых транспортных гелиевых сосудов приведены на рис. 22. Сосуды состоят из вакуумного кожуха 1, внутри которого расположены гелиевый объем 2 и азотная ванна 4 с медным экраном 5. Теплоизоляция 6 внутреннего гелиевого объема — высоковакуумная, азотной ванны — многослойная экранно-вакуумная. Горловина гелиевого объема 3 оканчивается арматурной головкой 7, на которой имеются штуцера для присоединения наливной трубки, манометр и предохранительная диафрагма. Габаритные размеры указаны на рисунке для сосуда емкостью 40 л. Сосуды могут перевозиться любым видом транспорта, включая и авиацию. Следует отметить, что по техническим характеристикам серийно выпускаемые нашей промышленностью сосуды для азота и гелия находятся на уровне лучших зарубежных образцов.

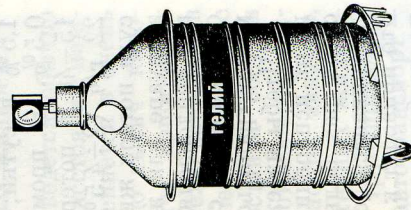
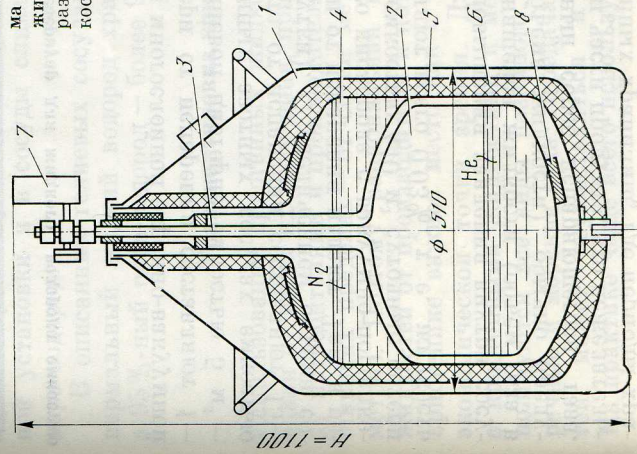
Сосуды для криогенных жидкостей емкостью более 300 л обычно называются цистернами, а емкостью более 50 м<sup>3</sup> — резервуарами. В большинстве случаев цистерны имеют многослойную экранно-вакуумную или вакуумно-порошковую тепловую изоляцию. Внешний вид стационарной цистерны для жидкого водорода емкостью 340 м<sup>3</sup> с такой теплоизоляцией показан на рис. 23. Для крупных стационарных хранилищ жидкого кислорода и азота, имеющих в настоящее время вместимость до 6 тыс. м<sup>3</sup>, обычно применяют насыпную газонаполненную теплоизоляцию. Криогенные

рис. 21. Схема устройства и общий вид сосудов для жидкого азота  
1 — кожух; 2 — внутренний сосуд; 3 — горловина-подвеска; 4 — теплоизоляция; 5 — адсорбент для поддержания вакуума; 6 — подставка; 7 — пробка

хранилища большого объема широко применяются в ракетно-космических системах, использующих в качестве горючего жидкий водород, а в качестве окислителя — жидкий кислород. Так, например, стартовый комплекс американской ракеты «Сатурн-V» оснащен криогенными хранилищами жидких кислорода, водорода и азота общим объемом более 10 тыс. м<sup>3</sup>.

Потери на испарение криогенной жидкости при хранении зависят от рода жидкости, объема сосуда и вида теплоизоляции. Так, в гелиевых сосудах

рис. 22. Конструктивная схема и общий вид сосудов для жидкого гелия (габаритные размеры — для сосуда емкостью 40 л)





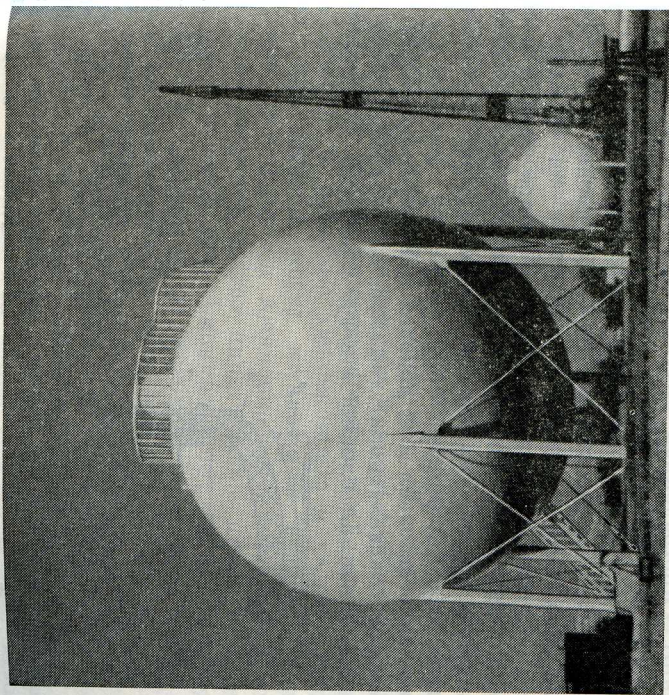


Рис. 23. Стационарный резервуар для жидкого водорода емкостью 340 м<sup>3</sup>

емкостью 10—100 л с многослойной экранно-вакуумной теплоизоляцией потери от испарения составляют 1—1,5% в сутки; в гелиевой цистерне емкостью 5 м<sup>3</sup> — 0,5%. В промышленных азотных сосудах емкостью 15—40 л потери азота от испарения составляют 15—22 г/ч (2÷4,5% в сутки). С увеличением объема сосуда потери жидкости от испарения падают. Так, в резервуаре для жидкого кислорода с вакуумно-порочковой теплоизоляцией емкостью 440 м<sup>3</sup> суточные потери от испарения составляют всего 0,03%, т. е. жидкость может храниться год.

Чтобы избежать повышения давления внутри сосуда от испарения хранящейся жидкости (объем газа в сотни раз больше объема жидкости), обычно предусматривается свободный сброс испаряющегося газа. Это приводит к потере части продукта, что нежелательно, особенно для крупных хранилищ, где периоды хра-

нения криопродуктов перед использованием могут быть весьма большими — месяцы и годы. Для предотвращения потерь продукта и сохранения его в жидкой фазе большие хранилища иногда оборудуются установками для обратной конденсации испаряющегося газа. В качестве установок обратной конденсации могут использоваться и криогенно-газовые машины.

В проблеме длительного хранения криогенных жидкостей особое место занимает жидкий водород. Это связано с тем, что водород, как указывалось выше, состоит из орто- и пара-молекул, равновесное соотношение между которыми зависит от температуры. Если сжижить нормальный водород (он состоит из 75% орто-молекул и 25% пара-молекул), то в жидкости оудет происходить самопроизвольный переход орто-молекул в пара-молекулы, сопровождающийся выделением тепла, которое по величине превышает теплоту испарения жидкого водорода. Таким образом, нормальный жидкий водород, залитый даже в идеальный, не имеющий никаких притоков тепла сосуд, через некоторое время перейдет в газообразное состояние вследствие испарения жидкости от тепла орто- пара-конверсии. Для длительного хранения жидкого водорода эту конверсию проводят внутри водородо-ожижительной установки и в сосуды сливают почти 100%-ный пара-водород.

В описанных гелиевых сосудах с азотным экраном нормальный жидкий водород хранится около месяца, а 95%-ный пара-водород — более 9 месяцев.

### Транспортировка криогенных жидкостей

Использование криогенных жидкостей ведется обычно вдаль от места их получения, причем расстояние между потребителями и производителями меняется в очень широких пределах — от сотни метров до тысяч километров. Поэтому рациональная передача криогенных жидкостей от производителя к потребителю занимает в криогенике важное место как с технической, так и с экономической точки зрения. Для доставки сосудов с криогенными жидкостями к месту потребления используются все виды наземного транспорта, авиация, речные и морские суда. Передача криогенных жидкостей может осуществляться и по трубопроводам. На практике чаще всего используется автотранспорт —



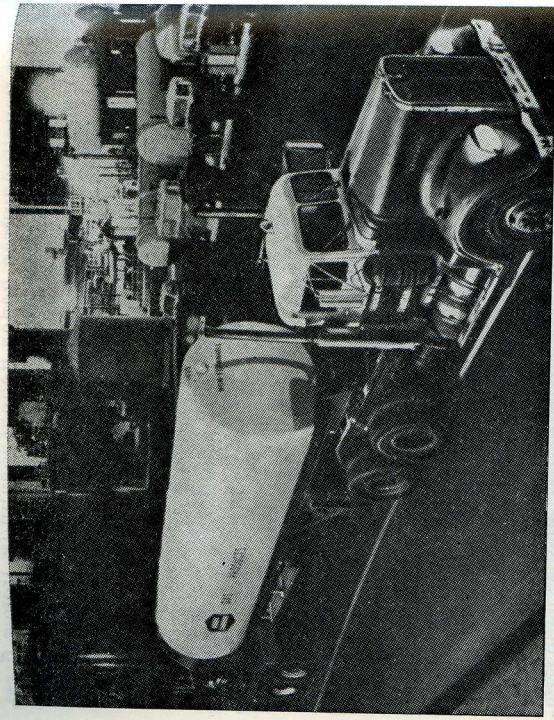


Рис. 24. Автоприцеп для перевозки сжиженного азота

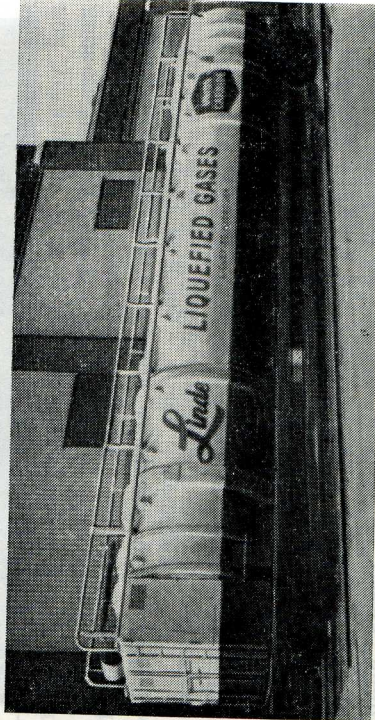


Рис. 25. Железнодорожная цистерна для жидкого водорода емкостью 110 м<sup>3</sup>

обычные грузовые автомобили для перевозки сосудов небольшой и средней емкости и автоприцепы для цистерн и резервуаров большой емкости. На рис. 24 показан автоприцеп для перевозки крупных цистерн с криогенными жидкостями. Такие автоприцепы использу-

ются для централизованного снабжения потребителей криогенными жидкостями. Перевозка значительных количеств жидких азота, кислорода и водорода производится и железнодорожным транспортом в устанавливаемых на железнодорожных платформах резервуарах емкостью до 100 м<sup>3</sup>. Представление о том, как выглядит такая железнодорожная цистерна, дает рис. 25.

Во время транспортировки испаряемость жидкостей вследствие колебаний и вибраций увеличивается в 2—3 раза (иногда и больше, например, на плохой дороге) по сравнению с испаряемостью в стационарных условиях. Чтобы иметь меньший вес пустой тары, сосуды и цистерны для транспортировки криогенных жидкостей рассчитываются обычно на невысокое рабочее давление ~0,2—0,25 МПа (2—2,2 атм), резервуары — до 0,5 МПа (5 атм). Специальные предохранительные клапаны не допускают создания в сосуде давления выше установленного, сбрасывая испарившийся газ в атмосферу. Для уменьшения потери ценного продукта, например гелия, от сброса газа в атмосферу транспортные цистерны иногда рассчитываются на более высокое давление, чем стационарные, что позволяет во время перевозок не сбрасывать испаряющийся газ в атмосферу. Такие бездренажные перевозки весьма выгодны.

Серийно выпускаемая нашей промышленностью цистерна для жидкого гелия емкостью 5 м<sup>3</sup> допускает повышение давления в ней до 0,6 МПа (6 атм), что позволяет не сбрасывать из нее испаряющийся газ две-три недели. Такое же время бездренажного хранения допускает транспортная гелиевая цистерна фирмы «Линде» (США) емкостью 40 м<sup>3</sup>, рассчитанная на давление 0,9 МПа (9 атм). Это позволяет перевозить криоагенты через всю страну без потерь газа. На большие расстояния, например, из США в Европу или из европейской в азиатскую части СССР, перевозка жидкого гелия часто производится самолетами. В этих случаях сосуды должны снабжаться устройствами, автоматически поддерживающими заданное давление над жидкостью, независимо от давления за бортом самолета, куда и сбрасывается излишек газа.

В криогенную практику все больше входит и перевозка больших количеств жидких криопродуктов по трубопроводам. Помимо широкого использования трубопроводов небольшой длины, связывающих круп-



ные ожигатели с хранилищами и отдельными крупными потребителями, все чаще строятся трубопроводы большой протяженности для перекачки в первую очередь сжиженного природного газа, а также жидкого водорода и жидкого кислорода. Так, в США действуют трубопроводы диаметром 150 и 400 мм, длиной до 0,5 км для жидких кислорода и водорода, а на Калифорнии 9 км сжиженного природного газа. Для передачи электроэнергии по сверхпроводящим трубопроводам разрабатываются многокилометровые трубопроводы жидкого гелия. При транспорте жидких криогенных продуктов по трубопроводам возможно появление двухфазного потока вследствие испарения части жидкости от притока тепла из окружающей среды через теплоизоляцию. Допустимая скорость движения двухфазного потока ниже, чем однофазного, и это приводит к существенному уменьшению пропускной способности трубопровода. В качестве средств борьбы с появлением двухфазного потока применяют повышение давления в системе переохлаждения жидкости, а также использование высокоэффективных методов теплоизоляции. Для изоляции криогенных продуктов применяют пористые и волокнистые материалы с низким коэффициентом теплопроводности, вакуумно-порошковые и многослойные экранно-вакуумные виды изоляции. Для жидких азота и кислорода теплоизоляционные материалы могут находиться под атмосферным давлением.

Применение многослойной экранно-вакуумной теплоизоляции в трубопроводах для жидкого гелия позволяет снизить теплопритоки до 1–2 Вт на 1 пог.м. Дальнейшее уменьшение притока тепла к жидкому гелию может быть достигнуто введением экрана, охлаждаемого жидким азотом или холодным газом.

В трубопроводах с вакуумно-плотным кожухом длина внутренней трубы заметно уменьшается при охлаждении, тогда как длина кожуха почти не меняется. Для компенсации температурных деформаций чаще всего устанавливаются сильфоны — гибкие детали трубопровода.

Отдельную трудную задачу представляет первоначальное захлаживание длинных криогенных трубопроводов. Для уменьшения времени охлаждения в этих случаях через определенные интервалы по длине трубопровода устанавливаются вентили для выпуска газа или спе-

циальные газожидкостные сепараторы, что позволяет не прогонять газ по всей длине трубопровода и ускорять продвижение фронта жидкости.

Конструкции криогенных трубопроводов непрерывно совершенствуются, так как их использование весьма перспективно. Большой интерес представляет криогенный трубопровод с тепловой изоляцией, наносимой не на наружную, а на внутреннюю поверхность трубы. При таком способе изоляции наружная металлическая труба находится при нормальной температуре и может изготовляться из обычной углеродистой стали, которая в 3–8 раз дешевле специальных сталей, применяемых сейчас при криогенных температурах; уменьшаются также расходы на захлаживание и упрощается задача компенсации температурных деформаций.

В современной энергетике большую роль играет использование природного газа, основным компонентом которого является горючий метан. Он широко применяется и в быту: многие пользуются газовыми плитами. Природный газ может доставляться потребителям как в газообразном, так и в жидком виде. В СССР построена целая система магистральных трубопроводов (наиболее известный из них «Дружба»), по которым природный газ подается во многие города и экспортируется за границу. Для уменьшения расходов на транспортировку выгодно передавать газ в сжиженном виде и испарять его на месте потребления. При сжижении объем природного газа уменьшается в 600 раз, т. е. это эквивалентно сжатию газа до 60 МПа (600 атмосфер).

Помимо СССР, большими запасами природного газа обладают Алжир, Ливия, Индонезия и другие развивающиеся страны, а главные потребители находятся в Европе, США и Японии. Непрерывное увеличение мирового потребления природного газа привело к стремительному росту масштабов его производства в сжиженном виде, удобном для транспортировки. Сейчас в мире сжижается более 40 млрд м<sup>3</sup> газа в год. Доля сжиженного природного газа (СПГ) в общем газопотреблении в передовых промышленно развитых странах составляет от 22 до 85%. Из стран-экспортеров СПГ доставляется основным потребителям в морских танкерах-метановозах большой вместимости — до 120 тыс. м<sup>3</sup>. Танкеры оборудуются установками для повторной конденсации газа, образующегося вследствие испарения жидкости



во время рейса. Флот танкеров-метановозов все время увеличивается.

Для сжижения газа в странах-экспортерах построены крупные базовые заводы. В портах отправления и приемки СПГ строятся терминалы с системой крупных хранилищ, насосов и трубопроводов. Для перевозки СПГ внутри страны используется также железнодорожный и автомобильный транспорт.

Экономическая и экологическая целесообразность применения СПГ стимулирует использование его рядом с промышленными целями в качестве моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания автомобилей, речных и морских судов, в авиации и на железнодорожном транспорте. В СССР недавно прошли успешные испытания самолета ТУ-155 на сжиженном природном газе. В авиации СПГ может использоваться не только в виде топлива, но и в качестве эффективного хладагента для охлаждения агрегатов и обшивки скоростных самолетов. Весьма просто использовать СПГ на автомобилях, работающих на сжатом газе, — требуется только вместо баллонов установить криогенный топливный бак.

Решение проблемы длительного хранения и крупномасштабного транспорта в жидком виде природного и других важных для хозяйственной деятельности газов еще раз показало преимущества использования криогеники для технического прогресса.

## Глава 14. Твердые криоагенты

Как уже указывалось выше, наиболее распространенным средством охлаждения в области криогенных температур являются различные криогенные жидкости — жидкие азот, гелий, неон и др. Однако имеется целый ряд случаев, когда удобнее эти криогенные средства использовать не в жидком, а в твердом состоянии, подобно тому как в быту мы широко применяем для охлаждения водяной лед и твердую углекислоту. Чтобы получить вещество в твердом состоянии, его нужно охладить ниже температуры так называемой тройной точки — физической константы данного вещества. Так, для обычной воды тройная точка равна 273,16 К, или 0° С. Практически переход из жидкого в твердое со-

стояние можно произвести путем откачки паров над жидкостью вакуум-насосом до давления, соответствующего тройной точке. Для воды это давление равно ~6 гПа (4,58 мм рт. ст.), для жидкого азота — 125 гПа (94 мм рт. ст.) и т. д.

Получение твердой фазы вещества путем откачки его паров часто называют самозамораживанием. Помимо самозамораживания, твердую фазу из жидкой можно также получить охлаждением с помощью соответствующей криогенной машины (как мы получаем водяной лед в домашнем холодильнике) или же с помощью другой криогенной жидкости, имеющей температуру кипения ниже температуры замерзания нужного нам вещества. Так, например, жидкий азот и кислород можно заморозить с помощью жидкого водорода и неона, жидкий неон — с помощью жидкого водорода, а сам жидкий водород — с помощью жидкого гелия. Подобно тому как температура жидкости зависит от давления над ней, так и температура твердого криоагента (кристалла) меняется от давления, под которым он находится. С понижением давления температура и жидких, и твердых криоагентов понижается. Это физическое свойство широко применяется на практике для расширения интервала температур, получаемых на данном криоагенте. Если изменить давление над твердым криоагентом от равновесного давления, соответствующего тройной точке, до 0,1 мм рт. ст., то можно получить криогенные температуры (К) в следующем интервале:

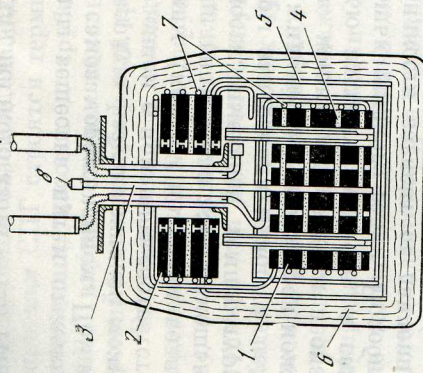
| Криоагент | Интервал  | Криоагент   | Интервал  |
|-----------|-----------|-------------|-----------|
| Водород   | 13,8–8,3  | Аргон       | 83,9–47,8 |
| Неон      | 24,3–13,5 | Метан       | 90,7–59,8 |
| Азот      | 63,1–43,4 | Углекислота | 217,5–125 |

Углекислота не относится к числу криогенных продуктов (температуры ее лежат выше 120 К), но она применяется в качестве дополнительного охладителя при работе с другими твердыми криоагентами и потому входит в приведенный список.

Процесс перехода из твердого состояния в газообразное называется сублимацией, а системы охлаждения, использующие твердые хладагенты, обычно называют сублимационными аккумуляторами холода (сокращенно — САХ). Преимуществом САХ является их простота, надежность, отсутствие энергопотребления



Рис. 26. Конструктивная схема сублимационного рефрижератора  
 1 — камера для твердого аргона;  
 2 — камера для твердой углекислоты;  
 3 — медный холодопровод;  
 4 — диски из пористой меди;  
 5 — экран, охлаждаемый углекислотой;  
 6 — многослойная теплоизоляция;  
 7 — змеевик для замораживания хладоагентов;  
 8 — охлаждаемый детектор



и движущихся частей, вызывающих шум, вибрацию и электрические помехи. К недостаткам САХ относятся необходимость иметь в них устройства (например, пружины), обеспечивающие хороший тепловой контакт между твердым криоагентом и охлаждаемым объектом. Обычно сублимационные аккумуляторы холода применяются для охлаждения объектов с малыми тепловыделениями и длительным циклом работы. Эти преимущества, а также большой запас холода на единицу объема по сравнению с криогенными жидкостями (теплота сублимации выше теплоты испарения) и возможность работать в любом положении делают сублимационные системы охлаждения привлекательными для использования на борту космических кораблей. В САХ может использоваться или один твердый криоагент, или два, например, аргон и углекислота, метан и углекислота и т. д. Системы с двумя криоагентами позволяют значительно (примерно вдвое), увеличить ресурс работы рефрижератора, доводя его до года и более. На рис. 26 показана конструктивная схема сублимационного рефрижератора с двумя криоагентами — твердым аргоном и твердой углекислотой. Рефрижератор предназначен для охлаждения до 50 К приемников излучения.

Один из криоагентов является рабочим, другой — охраным, компенсирующим часть теплопритока к охлаждаемому объекту из окружающей среды через теплоизоляцию. Охлаждаемый приемник помещается на конце медного стержня, нижняя часть которого находится в контейнере с твердым аргоном; для лучшего контакта между охлаждаемыми узлами и теплового контакта между охлаждаемыми дисками криоагентами внутри контейнеров установлены диски из пористой меди. В теплоизоляции САХ чаще всего используется вакуумно-многослойная изоляция с охлаждаемыми экранами. Для работы в течение одного года показанный на рисунке рефрижератор должен иметь ~6,2 кг аргона и ~4 кг углекислоты. Общая масса рефрижератора — 16 кг. Если исключить вспомогательный криоагент — твердую углекислоту, то, как показывают расчеты, количество аргона необходимо увеличить втрое. Хорошими свойствами для САХ обладает твердый метан, имеющий большую теплоту сублимации по сравнению с другими криоагентами. Так, если вместо аргона применить твердый метан, масса рефрижератора может быть уменьшена до ~10 кг, но температура охлаждения повысится до 65 К. Для получения более низких температур используются твердые водород и неон.

## Глава 12. Криогеника и космос

В освоении космического пространства криогенные методы и продукты играют все возрастающую роль. Использование криогеники в этой области развивается по трем основным направлениям: применение криогенных двигателей в ракетных системах для запуска космических кораблей; обеспечение энергией установленных на борту корабля приборов, управляющих и контролирующих систем, а также личных потребностей самих космонавтов; охлаждение различных бортовых устройств, требующих для своего действия криогенных температур (например, имеющих сверхпроводящие узлы), а также с целью повышения чувствительности и эффективности работы некоторых приборов.

Выше уже упоминалось об использовании жидких водорода и кислорода в качестве топлива для ракетных двигателей. По сравнению с другими видами топлива



водород дает наибольший удельный импульс, т. е. позволяет получить наибольшую тягу. Именно поэтому криогенные двигатели применены в советском ракетоносителе «Энергия», являющемся в настоящее время самым мощным в мире. Как сообщалось в «Правде» (от 11 июля 1987 г.), ракетоноситель «Энергия» может вывести на орбиту полезный груз более 100 т. Каждый водородо-кислородный двигатель «Энергия» создает тягу в 200 т. Поражают и размеры этого ракетоносителя: стартовая масса — более 2000 т, длина — 60 м, т. е. выше 22-этажного дома.

Впервые широко применили криогенные двигатели в 60-х годах американцы в ракетно-пусковых системах «Сатурн» для вывода на орбиту космических кораблей по программе «Аполлон». Целью программы «Аполлон» была высадка астронавтов на Луну, что и было успешно осуществлено. Напомним, что первыми людьми, вступившими на поверхность Луны, были астронавты Нейл Армстронг и Эдвин Олдрин, достигшие Луны в июле 1969 г. на корабле «Аполлон-11». После первого космического полета Юрия Гагарина в апреле 1961 г. это одно из ярких достижений современной космонавтики.

Использование криогенных ракетных двигателей будет несомненно расширяться, что подтверждается применением их для запуска кораблей многообразного назначения (американских «Шаттл» и советского «Бурана»). Французская ракетная система «Ариан» также имеет криогенные ступени.

Энергетические потребности на борту самих космических кораблей, а также на космических станциях сейчас удовлетворяются с помощью солнечных батарей, сжиганием водорода в топливных элементах, а также сжатыми или сжиженными газами. Перспективно применение бортовых ядерных реакторов для получения энергии — это дело ближайшего будущего. Применение криогенных жидкостей в топливных и газовых бортовых системах выгодно, так как из 1 л жидкости получается ~1000 л газа. Наиболее широко криогенные жидкости используются с этой целью на американских космических кораблях. Так, на борту кораблей «Аполлон» устанавливаются четыре сосуда с жидкими водородом и кислородом. Сосуды имеют высоковакуумную теплоизоляцию и каждый содержит около 180 л жидкого водорода или 130 л кислорода. Водородные

сосуды рассчитаны на давление 1,7 МПа (17 атм), кислородные — на 6,3 МПа (63 атм). Это позволяет хранить водород и кислород в однофазном состоянии, так как указанные давления превышают критические. Каждый сосуд имеет реле для контроля давления и нагреватель. Поскольку хранимый водород и кислород используются в газообразном виде, выходная труба сделана небольшого диаметра и большой длины, что позволяет уменьшить приток тепла по ней к криогенту. Общий теплоприток составляет 1,5 Вт в водородных сосудах и 6,5 Вт в кислородных, причем в условиях полета он был такой же, как и на Земле.

Сосуды с жидкими водородом и кислородом устанавливаются и на кораблях многообразного использования типа «Шаттл» (американцы называют их «космический челнок»), которые взлетают вертикально, подобно ракете, и возвращаются на Землю подобно самолету. Недостатком метода хранения криогенных жидкостей под давлением является неполная пока гарантия их безопасной работы. Несколько раз сосуда с хранимыми криогенными жидкостями доставляли неприятности космонавтам. Так, на одном из «Аполлонов» взорвался сосуд с жидким кислородом, и экипажу пришлось прервать полет к Луне и с трудом возвратиться на Землю. Неисправность работы сосуда с водородом проявилась и на корабле многообразного использования «Дискавери». К счастью, в обоих случаях все кончилось благополучно. Эти происшествия, конечно, не прервут использования криогенных жидкостей на космических кораблях и станциях, но потребуют более совершенных конструкций сосудов.

Если применение криогенных продуктов в ракетно-пусковых системах и для обеспечения энергетических потребностей на борту космических кораблей является одним из возможных решений проблемы, то для охлаждения до низких температур различных приборов в условиях космического полета других альтернатив, кроме использования криогеники, нет. В первую очередь это касается приемников излучения, сверхпроводящих устройств (гироскопы, магнетометры, магнитные анализаторы частиц) и ряда других приборов для внеатмосферных исследований и сверхдальней связи. Особое значение имеет создание бортовых высокочувствительных малонеперционных приемников излучения, требующих охлаждения до гелиевых температур (0,3–5 К).



Научное и практическое значение бортовых приемников излучения определяется тем, что целые области Земли на уровне моря, так как поглощаются атмосферой. В значительной мере это касается субмиллиметровый или дальней инфракрасной части электромагнитного спектра, лежащей между длинами волн от 0,1 до 2 мм.

Среди наиболее интересных научных проблем астрономии, требующих для своего решения охлаждения до криогенных температур приемников излучения, можно назвать следующие:

- исследование фонового реликтового излучения Вселенной, открытого в 1965 г. и оценяемого примерно в 3 К;
- исследование химического состава межзвездной и межгалактической среды;
- исследование дискретных источников излучения, открытых в последнее время, — квазаров, инфракрасных звезд и др.;
- исследование в субмиллиметровом диапазоне длин волн Солнца и планет нашей солнечной системы;
- изучение верхних слоев атмосферы Земли — стратосферы.

Имеются и многие другие внеатмосферные исследования, нуждающиеся в приборах, высокая чувствительность которых достигается криогенным охлаждением. Охлаждение до криогенных температур объектов, установленных на космических кораблях и станциях, может быть осуществлено, как и на Земле, двумя основными методами: использованием криогенных жидкостей, полученных на Земле и хранимых на борту космического аппарата в специальных криостатах, и применением бортовой криогенной машины, вырабатывающей холод на необходимом температурном уровне.

В качестве криогенной жидкости в большинстве случаев желательно использование жидкого гелия, позволяющего получать наиболее низкие температуры, хотя в ряде случаев годятся и другие сжиженные газы (водород, неон, азот и т. д.). Применение жидкого гелия или другой криогенной жидкости позволяет просто и надежно термостатировать охлаждаемый узел, не требует дополнительного энергопотребления на борту и не вносит дополнительных механических помех (коле-

баний, вибраций и т. п.), что иногда очень важно для получения нужной чувствительности прибора.

Недостатком метода работы на криогенных жидкостях является непрерывный расход криоагента на компенсацию теплопритоков из окружающей среды независимо от включения в работу охлаждаемого угла. Любая теплоизоляция может только уменьшить эти теплопритоки, но не исключить их полностью. Поэтому общее время термостатирования ограничивается запасом взятой на борт криогенной жидкости. Криогенная машина может включаться в работу по мере надобности, и ресурс ее, определяемый износом механических частей, может быть велик (5–8 тыс. ч и более). Однако использование криогенных машин на борту космического корабля имеет и ряд существенных недостатков. Главные из них:

— большое энергопотребление, а оно на борту пока жестко ограничено. Например, даже в лучших образцах криогенных машин на 1 Вт полезной холодопроизводительности при гелиевых температурах (4–5 К) требуется более 1 кВт электрической мощности;

— значительный вес — 100 кг и более при холодопроизводительности 1–2 Вт в области гелиевых температур. С повышением рабочей температуры вес криогенных машин существенно снижается: при 20 К до нескольких десятков килограммов, при 80 К может быть менее 10 кг;

— необходимость полной динамической уравновешенности машин для предотвращения появления нежелательных колебаний и вибраций;

— относительная сложность устройства и изготовления по сравнению с приборами, заливаемыми криогенными жидкостями.

Поэтому в том случае, когда требуемое время охлаждения объекта не очень велико (несколько недель или месяцев) и обязательно нужны гелиевые температуры, предпочтение отдается системам, заливаемым жидким гелием. Для получения же азотных (порядка 80 К) и водородных (порядка 20 К) температур лучше иметь на борту криогенно-газовую машину или систему с твердыми криоагентами.

Основой для практического использования на космическом корабле жидкого гелия является создание бортовых сосудов и криостатов, в которых залитый на Земле жидкий гелий сохранялся бы в космосе неоходимое время. Условия космического полета



сомость, перегрузки на активных участках полета, изменение ориентации корабля в пространстве и др.) резко осложняют проблему хранения и использования жидкого гелия. Из-за малой теплоты испарения и низкой температуры кипения долговременное хранение жидкого гелия вообще представляет трудную задачу, и хотя она решена для земных условий, для космических кораблей это решение не годится. Устройство криогенных сосудов, работающих на Земле, основано на том факте, что под влиянием силы земного притяжения жидкость всегда расположена в нижней части сосуда, а пар — в верхней и всегда имеется четкая граница между ними. Выходная горловина сосуда, соединяющая холодный объем для криогенной жидкости с наружным теплым корпусом, расположена вертикально и испаряющийся газ, скапливающийся в верхней части сосуда, свободно проходит по горловине, снимая по пути большую часть тепла, передаваемого от наружного корпуса к хранимой жидкости через горловину. Это дает возможность резко повысить время хранения жидкости в сосуде, так как из-за большой разности температур на концах горловины (в случае жидкого гелия она равна почти 300°) теплоприток по горловине весьма значителен и без его снятия газом время хранения жидкости было бы небольшим. Если обычный криогенный сосуд наклонить более чем на 30°, то жидкость начнет интенсивно испаряться, а при больших наклонах просто выливаться наружу. Поэтому на всех находящихся в эксплуатации на Земле криогенных сосудах имеется надпись: «Не наклонять».

В условиях космического полета, когда гравитация отсутствует и имеет место невесомость, граница раздела жидкость—пар в сосуде становится неустойчивой и пар может вытеснить жидкость в горловину или иную линию сброса газа, что приведет к быстрому опорожнению сосуда. Такой же эффект дает и появление даже небольших ускорений, направленных вдоль линии выхода паров от испарения криогенной жидкости. А такие ускорения обязательно появляются, так как сосуд внутри космического корабля может занимать любые положения в пространстве, что все мы часто видели при телепередачах со спутников Земли или космических станций. Поэтому сосуды для хранения криогенных жидкостей на борту космических кораблей обязательно должны иметь специальные уст-

ройства, которые при любых положениях сосуда в пространстве обеспечивают свободный выход испаряющихся паров и в то же время удерживают саму жидкость внутри сосуда. Такие устройства называются разделителями фаз, и действие их основывается на различных физических свойствах жидкости и пара данного криогенанта.

Наиболее надежны разделители фаз, основанные на использовании теплообменно-рефрижераторных систем, в которых сбрасываемая из резервуара двухфазная смесь дросселируется до более низких давлений и температуры и пропускается через теплообменник для испарения жидкости, присутствующей в смеси, так что в выходную горловину сосуда всегда поступает только пар. Этот метод успешно применяется в советских бортовых гелиевых криостатах [9]. При хранении жидкого гелия в сверхтекучем состоянии (He-II) в качестве эффективного разделителя фаз в США используются пробки из пористого материала (металл, керамика) с очень узкими каналами.

Кроме разделителя фаз, бортовой криостат должен иметь автоматический клапан, поддерживающий заданное давление (а, следовательно, и температуру над жидким гелием) и сбрасывающий испаряющийся газ за борт корабля в космическое пространство с высоким вакуумом. Бортовые сосуды и криостаты имеют высоковакуумную или вакуумно-многослойную теплоизоляцию, и при надежной работе разделителя фаз время сохранения жидкого гелия в условиях космического полета практически почти такое же, как на Земле.

На рис. 27 показан общий вид радиометра для спутников Земли с детекторами, охлаждаемыми жидким гелием. С помощью этого радиометра в 1974 г. с борта ИСЗ «Космос-669» было измерено излучение атмосферы Земли в субмиллиметровом диапазоне электромагнитных волн. В криостат радиометра было залито 9 л жидкого гелия, которого было достаточно на шесть суток работы, в том числе более четырех суток в условиях космического полета. Для увеличения времени непрерывной работы охлаждающих детекторов или других устройств необходимо иметь на борту большее количество жидкого гелия. Так, по расчетам американских специалистов для работы охлаждаемых He-II устройств в течение года требуется примерно 700 л



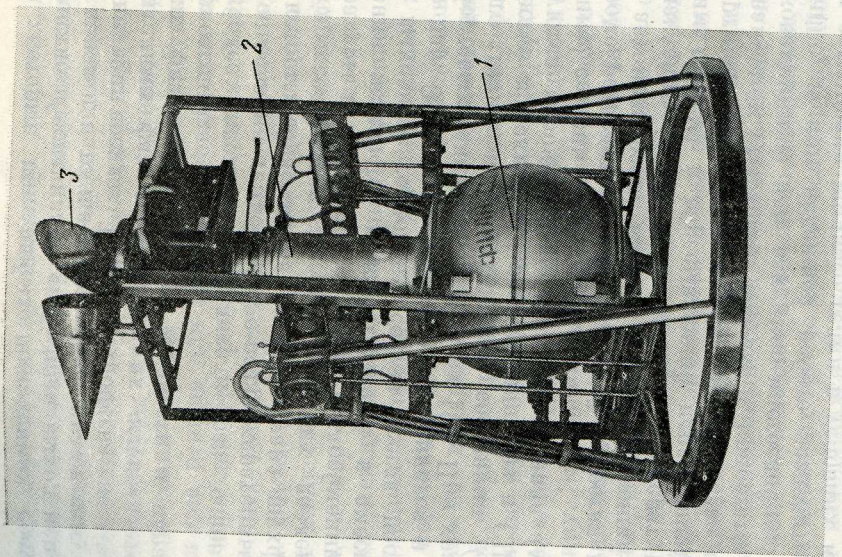


Рис. 27. Бортовой радиометр с охлаждаемыми приемниками излучения  
1 — криостат с жидким гелием; 2 — световод; 3 — телескоп

жидкого гелия. Такое количество иметь на борту космического корабля довольно затруднительно. Поэтому системы с заливаемым криоагентом могут применяться при сроках работы без дополнительных заправок примерно в 2–3 месяца, для чего достаточно ~80–100 л гелия.

Продолжительность полета космических аппаратов все время увеличивается, растет и число охлаждаемых объектов. Поэтому становится все более привлекательным использование вместо охлаждающих жидкостей криогенных машин, тем более что энергообеспечение их работы на борту становится все проще, а сами

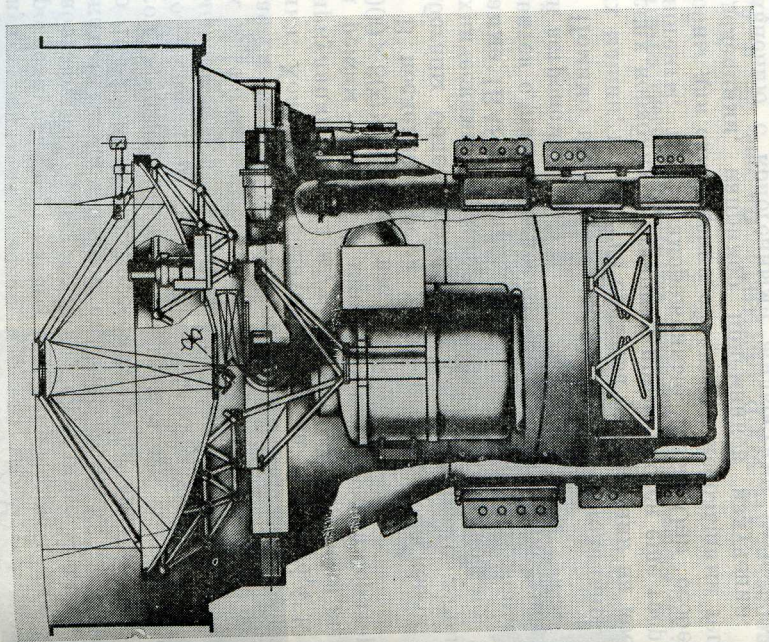


Рис. 28. Общий вид бортового телескопа (BST-1) с криогенной системой охлаждения (АСО)

машины непрерывно совершенствуются. По изложенным причинам криогенные машины, за исключением отдельных случаев, становятся основным источником для выработки низкотемпературного холода на борту космических станций.

На рис. 28 показан общий вид бортового телескопа BST-1A с гелиевым рефрижератором; телескоп был установлен и работал на космической станции «Салют-6». Диаметр зеркал телескопа весьма значителен: 1,5 м, что позволяет еще дальше проникнуть в глубь Вселенной для решения фундаментальных научных задач. Бортовой гелиевый рефрижератор представляет собой компактную установку замкнутого типа с тремя каскадами охлаждения: два каскада охлаждения дает



двухступенчатая газовая машина (КГМ), а третий — дросселирование сжатого в компрессоре гелия. КГМ работают по обратному циклу Стирлинга и охлаждают сжатый гелий в первой ступени до 80 К, во второй — до 16–18 К. После дросселирования охлажденного до этой температуры сжатого газа часть его сжимается. Полученный поток расширенного двухфазного гелия омывает камеру с приемниками излучения, охлаждает их до 4,5 К и через систему теплообменников возвращается на всос компрессора, замыкая, таким образом, цикл. Холодопроизводительность на уровне 4,4 К при циркуляции гелия  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  — около 0,5 Вт. Время выхода на режим — менее 1 мин. Габариты рефрижератора —  $1000 \times 800 \times 1200 \text{ мм}$ , вес — 127 кг.

В последнее время для бортовых телескопов разрабатаны более мощные рефрижераторы с лучшими техническими характеристиками (например, по программе IRAS). Охлаждаемые бортовые телескопы ставятся одним из основных инструментов внеатмосферной астрономии.

Помимо криогенных жидкостей и холодильно-газовых машин, в качестве средства охлаждения на космических кораблях и станциях применяются еще твердые криогенты, т. е. замороженные газы. Они особенно удобны для охлаждения объектов с небольшими тепловыделениями, например приемников излучения. По сравнению с криогенными жидкостями устройства с твердыми хладагентами имеют большой рабочий ресурс (удельная теплота сублимации выше теплоты испарения), конструктивно более просты и надежны, так как им не нужны разделители фаз, удерживающие жидкость внутри криостата в условиях невесомости и других особенностей космического полета. К тому же для создания необходимого в работе с твердыми хладагентами разряжения можно использовать вакуум космического пространства.

В бортовых сублимационных аккумуляторах холода (САХ) чаще всего используются твердые аргон и неон, а в качестве вспомогательного хладагента — твердая углекислота. Для получения температур выше 80 К пригодна комбинация из твердых метана и аммиака.

Бортовые САХ начали создаваться у нас и за границей (Франция, США) в середине 60-х годов. В СССР в их разработке большую роль сыграл и продолжает играть Физико-технический институт низких

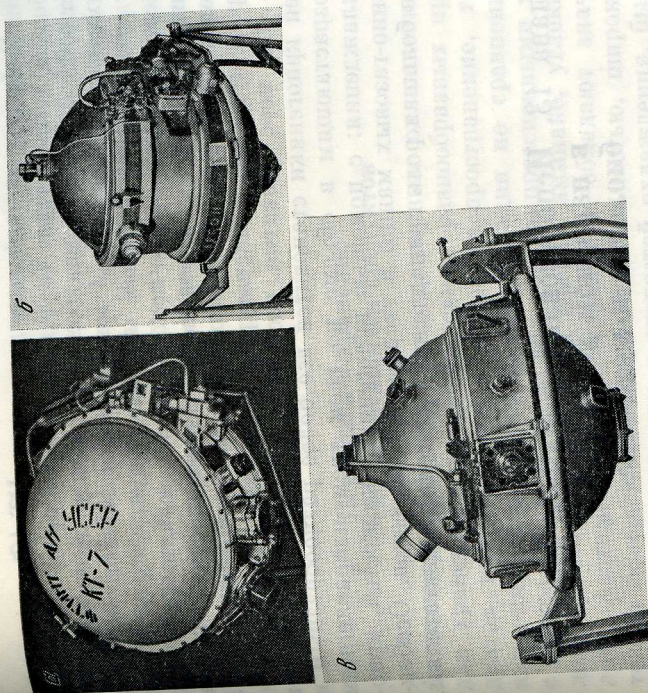


Рис. 29. Бортовые сублимационные аккумуляторы холода ФТИНТ

температур АН СССР (ФТИНТ). На рис. 29, а, б, в показаны некоторые бортовые сублимационные рефрижераторы, созданные в этом институте: КГТ-7 на твердом азоте (а), КГТ-12 на твердых аргоне и углекислом азоте (б) и КГТ-18 на твердом неоне (в) [10].

Криостат КГТ-7 использовался на станции «Салют-4» для охлаждения до 50 К приемника инфракрасного излучения телескопа ИТС-К. При холодопроизводительности 0,06 Вт непрерывное время работы было пять месяцев; масса рефрижератора — 32 кг. Если в этом рефрижераторе заменить твердый азот на твердый водород (конструкция это позволяет), то можно получать температуру 10 К в течение полутора месяцев.

В рефрижераторе КГТ-12 за счет применения двух твердых криогентов (аргона и углекислоты) ресурс работы был увеличен до 1 года при холодопроизводительности 0,065 Вт и рабочей температуре 55–80 К. Масса КГТ-12 — около 96 кг.



Рефрижератор на твердом неоне КТ-18 создает рабочую температуру 18 К при холодопроизводительности 0,6 Вт (в 10 раз больше, чем у первых двух), имеет ресурс работы 1 месяц; масса КТ-18 — 40 кг.

Из предварительных оценок следует, что хорошие перспективы имеет использование сублимационных систем охлаждения совместно с космическими радиаторами или холодильными машинами, работающими на промежуточных температурных уровнях.

По мере развития космонавтики использование в ней криогеники становится все более разнообразным и возрастающим в объеме по всем трем направлениям охлаждения: с помощью криогенных жидкостей, криогенно-газовых машин и твердых хладагентов. Особенно большая роль принадлежит криогенным двигателям.

### Глава 13. Использование жидкого азота в народном хозяйстве, биологии и медицине

В последние два десятилетия жидкий азот все более широко применяется в самых разнообразных отраслях народного хозяйства и в целом ряде направлений медицины.

В первую очередь жидкий азот используется для охлаждения, хранения и перевозки всех видов скоропортящихся пищевых продуктов (мяса, рыбы, плодов, овощей), эндокринно-ферментного сырья, спермы элитных животных, крови, костного мозга, человеческих органов и т. д. В виноделии и производстве безалкогольных напитков, витаминов, пряностей и вообще в биотехнологии холод и инертная среда, создаваемая с помощью жидкого азота, позволяют получать продукцию высокого качества с длительным сроком хранения. В хранилищах овощей и плодов жидкий азот используется как для быстрого охлаждения, так и для создания регулируемой газовой среды, что обходится дешевле, чем другими способами. Жидкий или газобразный азот все чаще применяется в качестве консервирующей среды в силосных башнях при хранении зерна, кормов и семян растений. Здесь, как и в других случаях, азот предотвращает перегревы, гниение,

развитие болезнетворных микробов и вредителей, позволяет решать и многие другие задачи.

Широкому использованию жидкого азота способствует его химическая инертность, что делает работу с ним совершенно безопасной. Жидкий азот не горит, не взрывается, не образует горячих смесей, а техника хранения и обращения с ним проста и хорошо освоена. К тому же стоимость его невелика, он дешевле всех криогенных жидкостей (тонна технического азота стоит ~40 руб.).

### Перевозка и хранение скоропортящихся продуктов

Автономные рефрижераторы с азотным охлаждением для хранения и перевозки самых разнообразных продуктов получают все большее распространение, так как они более просты в эксплуатации по сравнению с распространяемыми до сих пор компрессионными холодильными агрегатами на фреоне, аммиаке, углекислоте. Азотные системы охлаждения обладают значительно большей холодопроизводительностью, широким диапазоном температур и скоростей охлаждения, быстро восстанавливают температуру внутри изотермического кузова после закрытия двери. В объеме рефрижератора создается инертная атмосфера, что обеспечивает стерильность перевозимых продуктов, сохранение в них витаминов, белков и солей без образования токсичных соединений. В азотных авторефрижераторах охлаждение и термостатирование продуктов осуществляется регулируемой подачей распыленного жидкого азота или непосредственно в кузов транспортного средства (что наиболее просто), или с использованием дополнительных теплообменников. Наиболее совершенные современные системы на жидком азоте разработаны в Физико-техническом институте низких температур АН СССР [10].

Азотные рефрижераторы устанавливаются на изотермических автомобильных фургонах внутригородского применения с грузоподъемностью 4,5 и 5 т, на большегрузных полуприцепах грузоподъемностью 12 т для междугородных перевозок мяса, рыбы, молочных продуктов, плодов и овощей. Контейнеры с азотным охлаждением успешно испытаны на траулерах в условиях промысла и на перевозке рыбы из Крыма в



Москву. Азотная система охлаждения состоит из сосудов с жидким азотом, электроимпульсного насоса с форсунками для распыления азота и устройств для автоматического поддержания заданной температуры внутри охлаждаемого объема, куда загружается транспортируемый продукт. Подача распыленного жидкого азота может производиться и непосредственно из сосуда с азотом (без насоса), для чего в сосуде с помощью электронагревателя поддерживается избыточное давление порядка 100—140 КПа (1,0—1,4 атм). Сосуд для жидкого азота имеет экранно-вакуумную многослойную теплоизоляцию, вентили и трубопроводы изолируются пенопластом. Время действия азотного рефрижератора зависит от запаса жидкого азота. Так, в рефрижераторе, установленном на автомобиле грузоподъемностью 4,5 т, сосуд содержит 125 кг жидкого азота. При транспортировке 800—1600 кг груза средний расход азота составляет ~10 кг/ч. Температура в кузове может меняться от +10 до -20° С.

Опыт эксплуатации авторефрижераторов с жидким азотом подтверждает их целесообразность и экономическую эффективность для перевозок скоропортящихся продуктов внутри города, а также между городами при расстояниях до 500 км. Помимо автомобильных рефрижераторов, хорошие результаты получены на разработанных в этом институте контейнерах с азотным охлаждением, предназначенных для быстрого охлаждения и длительного хранения рыбы и рыбных продуктов при температуре от -1 до -3° С. Контейнер представляет собой теплоизолированный холодильный шкаф, на котором смонтирован охлаждающий модуль: лотки с продуктом устанавливаются в шкафу горизонтальными ярусами и так, что образуются вертикальные каналы, по которым циркулирует охлаждающая смесь воздуха и паров азота. Охлаждающий модуль состоит из сосуда с жидким азотом, форсунки для распыления жидкого азота и соответствующей регулирующей и контрольной аппаратуры. Жидкий азот из сосуда вырывается в воздушный поток, создаваемый вентилятором. При попадании в воздушный поток капли азота испаряются и интенсивно перемешиваются с воздухом, образуя однородный по температуре газовый поток, охлаждающий помещенный в шкаф продукт.

Размер контейнера 1850×810×2200 мм. Полезная

вместимость холодильного шкафа — 0,7 м³, что позволяет закладывать в него до 300 кг мелкой рыбы. Для ее охлаждения от +18 до -1° С требуется примерно 400 кг жидкого азота при времени охлаждения 1,5—2 ч. Сосуд для жидкого азота вмещает 125 кг этого криоагента. Такой контейнер оказался весьма полезным для охлаждения и хранения в условиях промысла мелкой рыбы, особенно шпрот. Шпроты, которые в значительном количестве водятся в Черном море, обладают хорошими вкусовыми качествами и высокой пищевой ценностью. Однако высокая ферментная активность не позволяет хранить эту рыбу более 36 ч с момента вылова, даже при охлаждении водным льдом, что создает большие трудности. При хранении в контейнерах с азотным охлаждением создаются условия, значительно снижающие активность ферментов и микроорганизмов (благодаря сочетанию охлаждения и инертной газовой средой), что позволило увеличить время хранения шпрот до 10 сут без снижения их качества.

Возможность быстрого охлаждения и замораживания позволяет применять контейнеры с жидким азотом для длительного хранения любых пищевых продуктов растительного и животного происхождения, а также эндокринных и других медицинских препаратов.

### Криогенное хранение биологических продуктов

Низкотемпературная консервация с помощью жидкого азота является в настоящее время единственным методом, позволяющим создавать и длительно хранить запасы крови, костного мозга, спермы элитных животных и других биоматериалов, а также пересаживаемых человеческих органов. Заливаемые жидким азотом сосуды и хранилища биопродуктов серийно выпускаются нашей промышленностью. В хранилищах обеспечивается программное замораживание, длительное хранение и отогрев биологических объектов, причем температуру хранения можно менять в широком интервале от 77 до 143 К (от -196 до -130° С).

На рис. 30 показано устройство сосудов серии СДС, специально разработанных для хранения и транспортировки спермы животных. По сравнению с обычными сосудами для жидкого азота эти сосуды (их называют



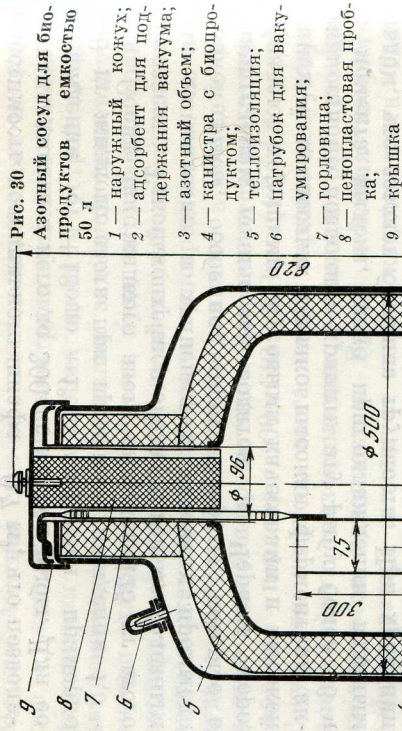


рис. 30  
Азотный сосуд для биопродуктов емкостью 50 л

- 1 — наружный кожух;
- 2 — адсорбент для поддержания вакуума;
- 3 — азотный объем;
- 4 — канистра с биопродуктом;
- 5 — теплоизоляция;
- 6 — патрубок для вакуумирования;
- 7 — горловина;
- 8 — пенопластовая пробка;
- 9 — крышка

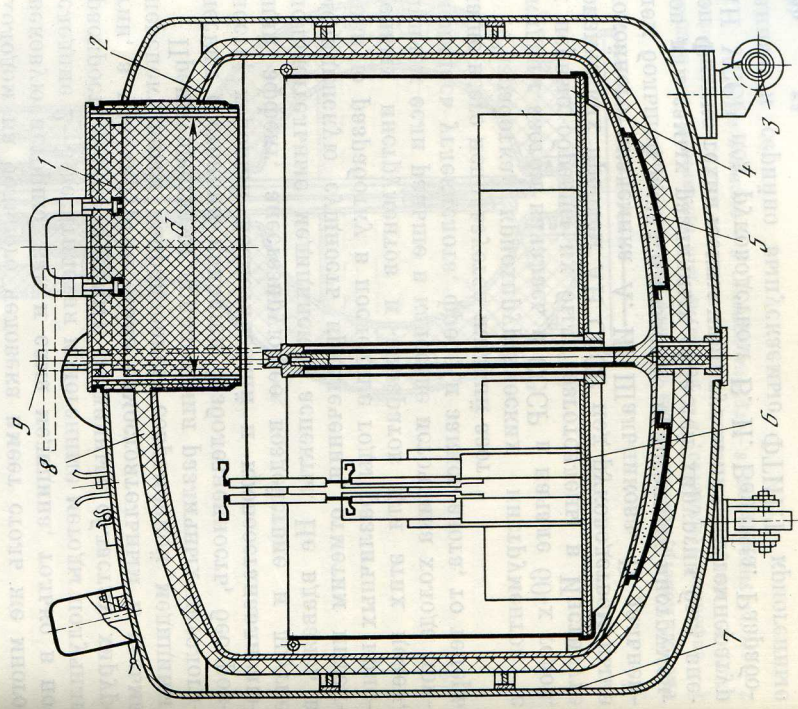


рис. 31. Общий вид и схема устройства хранилища биопродуктов ХБ-0,5

- 1 — крышка;
- 2 — внутренний сосуд;
- 3 — колесо;
- 4 — поворотный стеллаж;
- 5 — камера адсорбента;
- 6 — канистра;
- 7 — кожух;
- 8 — изоляция;
- 9 — рукоятка

сельскохозяйственными) имеют более широкую горловину и снабжаются канистрами для биопродукта. Сосуды серии СДС выпускаются емкостью от 5 до 50 л, а азот в них хранится от 1,5 до 6 месяцев (в зависимости от емкости), т. е. более длительное время, чем в обычных сосудах. Кроме сосудов, нашей промышленностью серийно выпускаются так называемые хранилища биопродуктов (индекс ХБ) вместимостью 240 и 550 л.

Хранилища биопродуктов применяются, как и описанные выше сосуды, в медицине и животноводстве. Устройство их показано на рис. 31. Хранилища представляют собой двухстенную емкость, состоящую из кожуха и внутреннего сосуда, подвешенного на горловине. В стационарных условиях, без биопродуктов, потери азота от испарения в хранилище ХБ-5 емкостью 550 л составляют около 1% в сутки. Масса хранилища — 300 кг. Теплоизоляция — вакуумно-многослойная. Биопродукты для хранения помещаются в канистры, которые размещаются на полочном стеллаже внутри емкости, заливаемой жидким азотом. В хранилище ХБ-5 можно поместить до 360 канистр с биопродукта-





ми. Для удобства перемещения хранилища устанавливаются на подвижных опорах. Заливка жидкого азота производится обычно из транспортных цистерн с помощью центрального насоса.

### Криогенные инструменты для медицины

Применение холода в медицине наряду с целебными травами и кровопусканием является одним из древнейших методов лечебного воздействия на организм больного человека. Еще в древнем Египте, за 2500 лет до нашей эры, применяли холодные компрессы для лечения переломов костей и ранений грудной клетки. В сочинениях «отца медицины» Гиппократ подробно описывается применение холода для остановки кровотечения из ран и при травматических отеках. Широко использовал охлаждение при лечении ран и наш знаменитый хирург Н. И. Пирогов. Но хотя воздействие холода на больного человека имеет столь же многовековую историю, как и сама медицина, только в последние 2–3 десятилетия криогенные методы получили распространение в самых различных областях хирургии, а криохирургия стала самостоятельным и весьма перспективным направлением современной медицины.

Преимуществами криолечения различных патологических состояний является безболезненность, бескровность, хороший косметический и кровоостанавливающий эффект, анестезирующее воздействие и другие положительные медицинские аспекты. Не вдаваясь в медицинскую сущность криолечения, отметим интенсивную разработку в последние годы различных криогенных инструментов и аппаратов для этих целей, причем если раньше в качестве источника холода применялась углекислота, фреон и закись азота, то теперь чаще всего используется жидкий азот.

Разработка криохирургических инструментов с жидким азотом началась в СССР в начале 60-х годов, и первые образцы их были изготовлены в Институте физических проблем АН СССР под руководством ныне покойного академика А. И. Шальникова. В дальнейшем большой вклад в создание криогенных инструментов для самых различных областей хирургии был внесен Физико-техническим институтом низких температур АН УССР под руководством Б. И. Веркина. Разработанные и серийно выпускаемые ФТИНТ криогенные

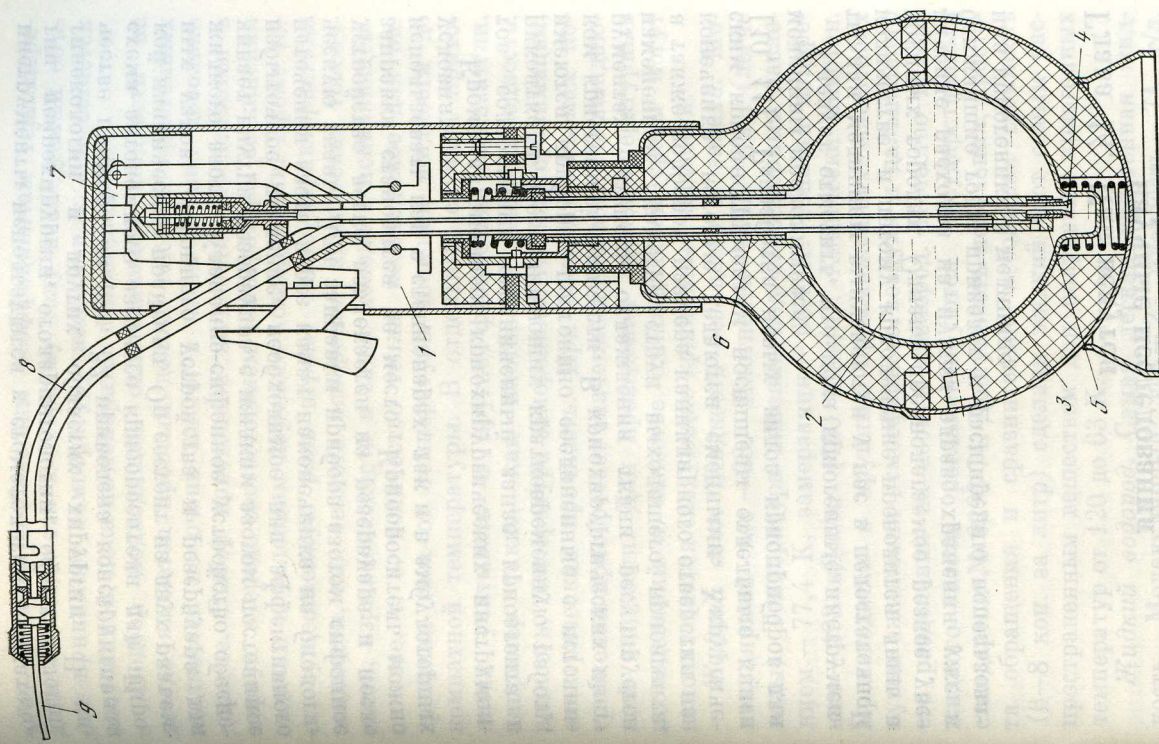


Рис. 32. Конструктивная схема азотного криооросителя

1 — сифонное устройство; 2 — резервуар для криоагента; 3 — жидкий азот; 4 — выпускной клапан; 5 — канал выхода азота; 6 — горловина; 7 — рычаг управления; 8 — трубка подачи; 9 — сменная игла



инструменты используются в стоматологии, дерматологии, нейрохирургии, отоларингологии, офтальмологии, гинекологии и других областях хирургии. В качестве примера на рис. 32 приведена конструктивная схема автономного азотного криооросителя для широкой клинической практики. Он состоит из двух разъемных узлов: сифонного устройства и резервуара для жидкого азота. Клапанно-сифонное устройство обеспечивает внутри резервуара с жидким азотом постоянное избыточное давление, необходимое для эффективного истечения азота через канал наконечника на биологическую ткань. Для заправки прибора азотом сифонное устройство легко извлекается из резервуара и после заправки становится на место. Криоороситель можно использовать как в стационарах, так и в амбулаторных условиях.

Кроме автономных криохирургических инструментов, содержащих ограниченный запас криоагента в рукоятке и обеспечивающих кратковременную работу, имеются приборы, постоянно соединенные с источником криогенной жидкости. В криохирургических инструментах степень охлаждения ткани регулируется изменением диаметра струи выходящего криоагента, а также подбором размера капиллярного отверстия наконечника, которые делаются сменными. Хирургическим криоинструментам посвящены отдельные книги [10, 11]. Разработка новых видов криоприборов для медицины продолжается.

Следует отметить, что пока криогенные инструменты для медицины выпускаются у нас в недостаточном количестве, и потому криолечение проводится лишь в крупных городах. Однако предполагаемое резкое увеличение расходов на нужды здравоохранения уже в ближайшие годы приведет к расширению использования криогеники в медицине.

## Глава 14. Как ведутся научные исследования при криогенных температурах

Наиболее простым и надежным способом охлаждения любого исследуемого объекта является погружение его в жидкость, имеющую нужную исследователю темпера-

туру. Благодаря большим коэффициентам теплопередачи от жидкости к твердому телу исследуемый объект принимает температуру жидкости и она остается постоянной, пока не испарится вся жидкость.

Подбор подходящей охлаждающей жидкости не всегда является простым делом, так как криогенных жидкостей не очень много, а часть из них довольно дорога. Выбор криогенной жидкости определяется в первую очередь соответствием температуры ее кипения задачам и условиям научного исследования. Кроме того, существенную роль играют такие характеристики жидкости, как теплота испарения, химическая токсичность, взрывоопасность и запас холода в испаряющемся газе, т. е. количество тепла, необходимое для нагревания газа от температуры кипения жидкости до комнатной температуры. В отдельных случаях приходится учитывать и другие физические показатели, например такие, как плотность, теплопроводность, вязкость, температура замерзания, теплота сублимации, электрическая прочность. При больших объемах потребления приобретает значение и стоимость охлаждающей жидкости. Для проведения низкотемпературных исследований в качестве охлаждающей среды могут использоваться следующие криогенные жидкости.

**Жидкий азот.** Жидкость без цвета и запаха. Молекулярный вес — 28. Плотность — 807 г/л (легче воды). Температура кипения под атмосферным давлением — 77,4 К, замерзания — 63,4 К. Теплота испарения — 198 кДж/кг (160 кДж/л). Химически инертен. Производится в крупных промышленных масштабах путем ожижения атмосферного воздуха и дальнейшего его разделения на азот и кислород. Качество и сорт жидкого азота регламентируются государственным стандартом № 9293-74. Доступность получения, простота обращения и сравнительно небольшая стоимость (6—8 коп. за литр) сделали жидкий азот самым распространенным веществом для получения криогенных температур от 120 до 63 К.

**Жидкий водород.** Самая легкая криогенная жидкость. Молекулярный вес — 2, плотность — 71 г/л. Температура кипения — 20,4 К, затвердевания — 13,9 К. Теплота испарения — 454 кДж/кг (32 кДж/л). Водород — горючий газ.

В смеси с воздухом водород образует взрывоопасную смесь в широком интервале концентраций от



4 до 75%. Это несколько ограничивает применение водорода как охлаждающей среды.

Водород имеет два изотопа: стабильный — дейтерий и радиоактивный — тритий с периодом полураспада 12 лет. Получаемая из дейтерия «тяжелая вода» ( $D_2O$ ) служит замедлителем быстрых нейтронов и теплоносителем в ядерных реакторах АЭС. В энергетике будущего дейтерий может иметь важнейшее значение как термоядерное горючее. Радиоактивный тритий применяется в реакциях термоядерного синтеза как горючее в термоядерных (водородных) бомбах, как изотопный индикатор в биологических исследованиях. Тритий получают в ядерных реакторах при облучении нейтронами лития.

Из-за экологической чистоты (при сгорании водорода получается обычная вода) водород считается перспективным горючим в энергетике будущего.

*Жидкий гелий.* Легкая, бесцветная, прозрачная жидкость. Имеет самую низкую температуру кипения из всех элементов таблицы Менделеева. Молекулярный вес — 4. Температура кипения под атмосферным давлением — 4,2 К, теплота испарения — 20,4 Дж/г (0,256 кДж/л), плотность — 125 г/л. Химически инертен. Гелий впервые был открыт в 1868 г. в спектре Солнца (отсюда и его название).

В зависимости от температуры жидкий  $^4\text{He}$  может находиться в двух состояниях: нормальном (до 2,17 К) и сверхтекучем (ниже 2,17 К). В качестве охлаждающих жидкостей используются оба вида гелия. Продажная цена жидкого гелия в 1988 г. равнялась 12 руб. за литр. Под давлением собственных паров гелий остается жидким вплоть до абсолютного нуля. Твердый гелий может быть получен под давлением  $\sim 2,6$  МПа (26 атм) при  $T = 4,46$  К.

У обычного гелия ( $^4\text{He}$ ) имеется стабильный изотоп  $^3\text{He}$ , встречающийся в природе крайне редко (примерно на 100 млн атомов  $^4\text{He}$  приходится 1 атом  $^3\text{He}$ );  $^3\text{He}$  получается в процессах, имеющих место в ядерных реакторах. В низкотемпературной физике жидкий  $^3\text{He}$  применяется для получения температур ниже 1 К.

*Жидкий кислород.* Жидкость голубоватого цвета, без запаха. Молекулярный вес — 32. Плотность — 1140 г/л (тяжелее воды). Температура кипения — 90,2 К, замерзания — 54,3 К. Теплота испарения —

212 кДж/кг (242 кДж/л), теплота плавления — 13,9 кДж/кг. Химически активен, интенсивно поддерживает горение. В отличие от азота, водорода и других простых газов кислород парамагнитен — жидкий кислород притягивается магнитом. Производится в крупных промышленных масштабах разделением сжиженного атмосферного воздуха. Жидкий кислород выпускается нескольких сортов по ГОСТ 6681-78. Стоимость  $\sim 40$ –60 руб. за тону.

Из-за высокой химической активности и связанных с этим опасностей жидкий кислород как средство охлаждения и получения криогенных температур применяется редко. Кислород чаще всего используется в газообразном виде (сварка и резка металлов, интенсификация процессов окисления в химии, в медицине, для дыхания летчиков и космонавтов и других целей). Перевозки значительных количеств кислорода выгоднее производить в жидком виде. Жидкий кислород в больших количествах применяется в ракетных двигателях как окислительный компонент топлива.

*Жидкий неон.* Химически инертная, тяжелая жидкость с плотностью 1204 кг/м<sup>3</sup>. Молекулярный вес — 20, температура кипения — 27,1 К, затвердевания — 24,6 К. Теплота испарения — 86 кДж/кг (106 кДж/л). Благодаря низкой температуре кипения, значительной теплоте испарения на единицу объема (в 40 раз больше, чем у гелия, и в 3,3 раза больше, чем у водорода) и взрывобезопасности жидкий неон получает все большее распространение как криогенный агент. Единственным препятствием для широкого применения жидкого неона является дороговизна газа ( $\sim 35$  руб./м<sup>3</sup>), связанная с небольшими пока объемами его производства. Увеличение производства неона приведет к снижению его стоимости и широкому использованию в криогенике.

Жидкий неон хранится дольше всех криопродуктов. Так, в сосудах небольшой емкости (20–50 л) с многослойной экранно-вакуумной изоляцией жидкий гелий хранится  $\sim 3$  месяца, жидкий пара-водород  $\sim 9$  месяцев, жидкий неон сохраняется до 1,2–1,5 года.

Такие криогенные среды, как жидкий аргон и сжиженный природный газ (метан), для охлаждения объектов в научных исследованиях почти не применяются.

Из всех перечисленных криогенных жидкостей наи-



более подходящими хладагентами для проведения низкотемпературных исследований следует считать жидкий гелий и жидкий азот как по своим свойствам, так и благодаря химической инертности. Главным же и первоим хладагентом всей физики низких температур является жидкий гелий.

Как известно из курсов физики, температура кипения жидкости зависит от давления паров над ней. Изменяя давление испаряющихся паров, температуру кипения можно изменять от критической температуры ее сжижения до температуры замерзания. Температуры кипения важнейших криоагентов в зависимости от давления приведены в табл. 4.

Таблица 4. Зависимость температуры кипения жидких криоагентов от давления

| Давление паров над жидкостью МПа (атм) | Температура жидкости, К |         |         |         |       |
|----------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|-------|
|                                        | Азот                    | Водород | Гелий-4 | Гелий-3 | Неон  |
| 0,2(2)                                 | 84                      | 23      | 5       | —       | 29,5  |
| 0,1(1)                                 | 77,3                    | 20,3    | 4,2     | 3,4     | 27    |
| 0,05(0,5)                              | 72                      | 18,1    | 3,6     | 2,6     | 25    |
| 0,02(0,2)                              | 66                      | 15,9    | 2,9     | 2,0     | 22,6* |
| 0,01(0,1)                              | 63*                     | 14,5    | 2,4     | 1,7     | 21,2* |

\* Кристалл.

При работе с криогенными хладагентами практически удобно иметь давление над жидкостью равным атмосферному или ниже его. Понижение давления над жидкостью ниже атмосферного и вплоть до так называемой тройной точки, когда жидкость замерзает, производится обычным вакуум-насосом. Таким образом сравнительно просто можно получить и поддерживать криогенные температуры от температуры кипения жидкости при атмосферном давлении до температуры ее замерзания. Так практически и обеспечиваются у различных жидкостей следующие температурные интервалы (К):

| Жидкость | Интервал | Жидкость | Интервал |
|----------|----------|----------|----------|
| Кислород | 90—55    | Водород  | 20,4—14  |
| Азот     | 78—63    | Гелий-4  | 4,2—1    |
| Неон     | 27—24,5  | Гелий-3  | 3—0,3    |

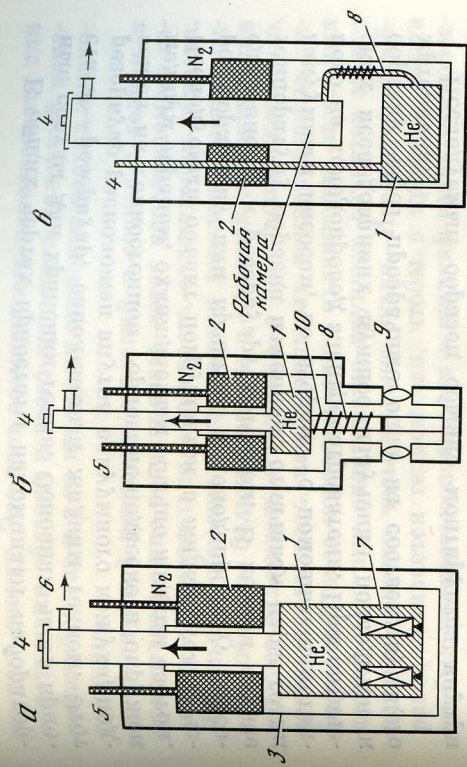


Рис. 33. Схемы гелиевых криостатов

1 — резервуар с жидким гелием; 2 — азотная ванна; 3 — радиационный теплоизолирующий экран; 4 — горловина для заливки жидкого гелия; 5 — горловина для заливки жидкого азота; 6 — патрубок для отвода газообразного гелия; 7 — сверхпроводящий электромагнит; 8 — холодотрап; 9 — оптическое окно; 10 — нагреватель

Температуры между указанными интервалами и также выше 90 К получают путем подогрева испаряющегося холодного газа соответствующего криопродукта. Температуры ниже тройной точки могут быть получены откачкой паров над кристаллом. Например, под давлением в ~15 Па температура твердого азота будет ~43 К, а твердого водорода — 8 К.

Исследования при низких температурах проводят в специальных устройствах — криостатах. В зависимости от назначения и характера исследований (существуют десятки криостатов могут сильно различаться (существуют десятки разновидностей)). На рис. 33, а, б, в показаны конструктивные схемы гелиевых криостатов для наиболее распространенных видов исследований: радиотехнических и электромагнитных (а), оптических (б), для охлаждения исследуемых образцов газом (в). Для прочности и долговечности большинство криостатов изготавливают из металла, хотя нередко встречаются и стеклянные криостаты, к преимуществам которых следует отнести возможность непосредственно наблюдать за исследуемым образцом.



В общих чертах криостаты напоминают лабораторные сосуды для хранения гелия. Основная часть криостата — резервуар, заполняемый жидким гелием. Этот резервуар расположен внутри вакуумного кожуха, подвешен на тонкостенной горловине-подвеске и окружен медным экраном, охлаждаемым обычно жидким азотом. Исследуемый объект погружается в жидкий гелий через горловину или крепится к холодопроводу, присоединенному к резервуару с гелием. В первом случае температуру образца изменяют, откачивая пары гелия вакуумным насосом, во втором — с помощью намотанного на холодопровод электронагревателя. При оптических исследованиях пучное излучение подводится к образцу через прозрачные окна из соответствующего материала.

Исследуемый образец обычно монтируется внутри гелиевого объема криостата на тонком подвесе из малотеплопроводного материала (например, на тонкостенной трубке из нержавеющей стали), чтобы свести к минимуму теплопровод к жидкому гелию, так как второй конец подвеса укрепляется на крыше криостата, имеющего комнатную температуру. Аналогично поступают и с различными проводами, отводимыми от исследуемого объекта к приборам, находящимся при комнатной температуре.

Смонтированный образец охлаждается путем постепенного заполнения гелиевого объема криостата из транспортной гелиевой емкости через трубку с высоковакуумной теплоизоляцией. После окончания залива эта трубка обычно вынимается, а отверстие, в которое она вставляется, заглушается резиновой или пластмассовой пробкой. Для переливания жидкости из транспортного сосуда в криостат необходимо создать некоторую разность давлений между ними (сосудом и криостатом). Для этого чаще всего в сосуде, из которого берется гелий, создают небольшое избыточное давление, достаточное для преодоления гидравлического сопротивления коммуникаций, по которым испаряющийся гелий выводится из криостата. Для залива гелия в криостат вместо создания избыточного давления в сосуде можно понизить давление в рабочем объеме самого криостата, откачивая его вакуум-насосом. Для экономии жидкого гелия криостаты, особенно крупные, предварительно охлаждают жидким азотом. Заливаемый гелий должен подаваться под образец, а не литься

на него сверху. Это дает возможность использовать для охлаждения образца и всего криостата холодный испаряющийся газ и в то же время экономит расход жидкого гелия.

Величиной разности давлений в сосуде с гелием и криостате можно регулировать поток переливаемого гелия, а следовательно, и скорость охлаждения образца. Небольшие образцы охлаждаются довольно быстро, однако объекты большой массы и сложной конфигурации следует охлаждать осторожно, с небольшой скоростью, чтобы не вызвать нежелательных температурных деформаций из-за неравномерного охлаждения отдельных частей. Поэтому охлаждение крупных объектов может длиться многие часы и даже сутки. Исследуемый образец заливаются гелием так, чтобы в процессе опыта он был полностью погружен в жидкий гелий, что обеспечивает постоянство его температуры, равной температуре самой жидкости.

Уровень жидкого гелия в стеклянных криостатах определяется визуально, что очень удобно и к тому же позволяет следить за состоянием образца. В металлических же криостатах приходится устанавливать указатели уровня различного вида (например, емкостные, термометрические и др.) или же иметь специальные оптические окна, что довольно сложно в конструктивном отношении. При работе с жидким азотом для наблюдений за его уровнем можно использовать поплавки из пластмассы с указательным стерженьком, выведенным наружу.

Одной из важнейших задач при проведении низкотемпературных исследований является определение температуры образца с нужной точностью. С понижением абсолютного значения температуры требования к точности ее измерения повышаются. Так, в районе азотных температур достаточно точность в несколько десятых градуса и ниже, в то время как в области гелиевых температур часто требуется знать температуру образца с точностью до тысячных долей градуса. Если образец полностью погружен в жидкость, а внутреннее тепловыделение в нем малы, можно считать его температуру равной температуре жидкости, которая определяется давлением паров над ней.

В различных справочниках имеются подробные таблицы и графики, связывающие температуры жидких гелия, водорода и неона с давлением паров над ними.



Несколько сложнее обстоит дело с жидким азотом, так как в нем всегда имеется небольшая примесь кислорода, влияющего на температуру жидкости. Причем по мере хранения технического жидкого азота содержание в нем кислорода увеличивается (азот испаряется быстрее, чем кислород) и может достигнуть значительных величин. Повышение содержания кислорода в жидком азоте повышает температуру жидкости, и это должно учитываться при определении температуры образца.

Давление паров над жидкими криоагентами можно измерять различными видами манометров, но для жидкого гелия наиболее удобны компрессионные манометры типа Мак-Леода, позволяющие измерять давление над жидким гелием с высокой точностью и в широком интервале давлений: от 1 атм до  $10^{-5}$  мм рт. ст. С помощью манометра Мак-Леода температура жидкого гелия может быть измерена с точностью выше тысячной доли градуса.

В весьма протяженной общей области криогенных температур жидкие криоагенты перекрывают только несколько относительно небольших температурных интервалов. Для исследований при температурах, не входящих в эти интервалы, охлаждение образцов производится чаще всего холодным газом, подогретым до нужной температуры. В этих случаях техника проведения низкотемпературного эксперимента резко осложняется. Из-за малой теплоемкости газа трудно поддерживать температуру образца с нужной точностью. Регулировку температуры образца приходится производить как изменением количества охлаждающего газа, так и степенью его подогрева. Но главная трудность связана с измерением действительной температуры образца. Хотя имеется значительное число различных видов термометров, предназначенных для этих целей, но почти все они обладают теми или иными недостатками. В основном в таких термометрах используется зависимость (изменение) электрического сопротивления примененного материала от температуры. В криогенике наибольшее распространение получили угольные термометры сопротивления, сходные с радиосопровивлениями, используемыми в радиоэлектронике. Электрическое сопротивление их резко возрастает с понижением температуры, достигая в гелиевой области десятков килоом. Они имеют небольшие размеры — несколько миллиметров, используют малую

силу тока — порядка миллиампер и менее, так что вносимое ими в образец джоулево тепло ничтожно мало. В низкотемпературных исследованиях хорошо себя зарекомендовали угольные сопротивления, выпускаемые фирмами «СПИР» и «Аллен-Бредли». Помимо угольных термометров, применяются также термометры сопротивления из платины, бронзы, облуженного индия и других материалов.

Для области азотных и водородных температур, когда большой точности не требуется, температура замедляется термометрами из различных материалов (медно-константановые, железо-золотые и др.). Преимущество термометров: простота изготовления и монтажа, малые размеры чувствительного элемента.

При установке термометров сопротивления важно обеспечить их хороший термический контакт с образцом. Для этого, помимо плотного прижима термометра к образцу, дополнительно применяют хорошо проводящие клеи, а сам термометр экранируют от посторонних тепловых излучений. Угольные термометры обеспечивают хорошую точность измерения, но со временем они обычно изменяют свою градуировку. Поэтому, как и некоторые виды термометров сопротивления, они должны подвергаться периодической проверке.

Необходимый уровень жидкого гелия в криостате, а также температура исследуемого образца могут поддерживаться автоматически. Системы автоматического регулирования температуры образца, погруженного в жидкость, основаны на управлении давлением над ее поверхностью. Если же образец охлаждается газом, то автоматически меняется количество подаваемого газа и его температура. В криостатах, предназначенных для исследований в магнитном поле, нижняя часть делается суженной, с тем чтобы ее можно было вставить между полюсами магнита. Сверхпроводящие же электромагниты обычно помещаются внутрь криостата.

Крупные уникальные установки для низкотемпературных исследований, отличающиеся большим потреблением жидкого гелия, снабжаются самостоятельными гелиевыми оживителями — рефрижераторами, имеющими замкнутую систему циркуляции гелия. В большинстве же случаев, когда проведение исследований не связано жестко с работой оживительной установки, используют привозной жидкий гелий. Необходимое для опытов количество жидкого гелия при этом доставля-



ется в транспортных сосудах с охлаждающей станцией, расположенной подчас на больших расстояниях от экспериментальной аппаратуры.

Так как гелий довольно дорогой газ (в 1988 г. цена его колебалась от 6 до 8 руб./м<sup>3</sup>), то из экономических соображений испаряющийся газообразный гелий собирают в специальные газгольдеры, из которых он откачивается компрессорами в стандартные стальные баллоны и возвращается в них на станцию для повторного сжижения. Установка для сбора газообразного гелия составляет необходимую часть криогенной системы, работающей на привозном жидком гелии.

Низкотемпературные исследования с помощью обычных криогенных жидкостей относительно просто проводить только до температур  $\sim 4$  К. Получение и измерение температур ниже 1 К (их часто называют сверхнизкими) гораздо труднее. Теоретически в этой области можно использовать две охлаждающие среды: жидкий  $^4\text{He}$  и его изотоп — жидкий  $^3\text{He}$ . Хотя жидкий  $^4\text{He}$  не замерзает вплоть до абсолютного нуля, но откачивать его при температурах ниже  $\sim 4$  К практически сложно и дорого. Связано это с тем, что откачка паров жидкого  $^4\text{He}$  после его перехода из нормального в сверхтекучее состояние (при  $T=2,17$  К) затруднена появлением тонкой пленки сверхтекучего гелия, которая непрерывно поднимается по стенкам сосуда в зону более высоких температур и там испаряется. Это явление резко увеличивает потери жидкого гелия и требует насосов очень большой производительности для поддержания необходимого давления паров над жидкостью. Поэтому ограничиваются созданием над жидким  $^4\text{He}$  давления в 10–15 Па ( $\sim 0,1$  мм рт. ст.), что и соответствует температуре 1 К.

Однако в настоящее время в физических исследованиях все чаще требуются более низкие температуры. Так, например, понижение температуры приемников инфракрасного излучения с 1,5 до 0,3 К позволяет увеличить их чувствительность примерно в 50 раз. Для получения температур от 1 до 0,3 К удобнее всего использовать стабильный изотоп обычного гелия — жидкий  $^3\text{He}$ , который обладает более высокой, чем  $^4\text{He}$ , упругостью паров и переходит в сверхтекучее состояние только при температурах ниже 0,0025 К. При атмосферном давлении температура кипения  $^3\text{He}$  составляет 3,19 К, т. е. на целый градус ниже, чем у  $^4\text{He}$ .

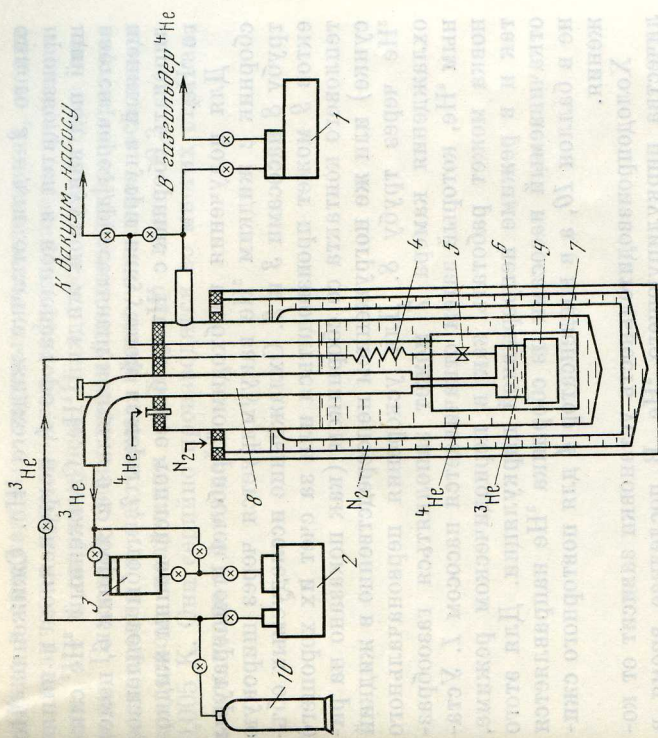


рис. 34. Схема установки для получения сверхнизких температур откачкой паров жидкого  $^3\text{He}$

Поэтому сжижение  $^3\text{He}$  осуществляется, как правило, с помощью жидкого  $^4\text{He}$ , кипящего под давлением ниже атмосферного и имеющего при этом температуру 2,0–2,5 К. Сжиженный таким путем  $^3\text{He}$  откачивается до нужного давления отдельной системой вакуум-насосов. Для получения температуры 0,3 К давление над жидким  $^3\text{He}$  должно быть 0,25 Па (0,002 мм рт. ст.), для получения температуры 0,5 К требуется давление  $\sim 20$  Па (0,15 мм рт. ст.) и т. д. Исследования с жидким  $^4\text{He}$  получают все большее распространение. На рис. 34 приведена схема установки для получения сверхнизких температур откачкой паров жидкого  $^3\text{He}$ .

Центральной частью установки служит цилиндрический гелиевый криостат (устройство его ясно из рисунка), внутри которого размещена система конденсации  $^3\text{He}$ . Необходимое оборудование состоит из механического вакуум-насоса 1 для откачки жидкого  $^4\text{He}$  и двух вакуум-насосов — механического 2 и диффузионного 3.



онного <sup>3</sup>Не — для откачки жидкого <sup>3</sup>Не. Сжижение <sup>3</sup>Не производится в конденсаторе 4, погруженном в кипящий под вакуумом жидкий <sup>4</sup>Не. Сжиженный <sup>3</sup>Не сливается через дроссельный вентиль 5 в сборник 6, помещенный внутри вакуумной камеры 7, чтобы теплоизолировать сборник с <sup>3</sup>Не от более теплой ванны жидкого <sup>4</sup>Не.

Для получения необходимой рабочей температуры сборник с жидким <sup>3</sup>Не вакуумируется через широкую трубу 8 насосами 3 и 2. Охлаждение исследуемых объектов 9 может производиться или за счет их хорошего теплового контакта со сборником (как показано на рисунке) или же погружением непосредственно в жидкий <sup>3</sup>Не через трубу 8. Для ускорения первоначального охлаждения камера 7 может заполняться газобразным <sup>4</sup>Не, который затем откачивается насосом 1. Установка может работать как в периодическом режиме, так и в режиме непрерывной циркуляции. Для этого откачиваемый насосами из сборника <sup>3</sup>Не направляется в баллон 10, а в конденсатор 4 для повторного сжижения.

Холодопроизводительность установки зависит от количества циркулирующего <sup>3</sup>Не. В последнее время в США и ФРГ появились малогабаритные переносные рефрижераторы с <sup>3</sup>Не для получения температур до 0,3 К. В СССР такой рефрижератор с оригинальным решением ряда узлов разработан в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР и выпущена первая их серия для охлаждения приемников излучения.

Рефрижератор ФИАН является автономным и для его работы требуется только обычный жидкий гелий, доставляемый со стороны. Ожижение <sup>3</sup>Не производится методом адиабатического расширения из сосуда постоянного объема. Создание необходимого перед расширения давлением (2,5–3,0 атм) и откачка ожиженного <sup>3</sup>Не для получения рабочей температуры производится адсорбционным насосом. Холодопроизводительность рефрижератора — 40 мВт при 0,36 К. Длительность рабочего цикла — 9 ч, подготовительное время — около 40 мин. Расход обычного жидкого гелия — 0,15 л/ч. Габариты рефрижератора: диаметр наружного корпуса — 230 мм, высота — 500 мм, масса — 9 кг.

Как упоминалось, испарением криогенных жидкостей можно получать только температуры выше 0,3 К. Температуры ниже 0,3 К используются пока

только в специальных научных исследованиях, и для их получения применяются рефрижераторы растворения <sup>3</sup>Не в сверхтекучем <sup>4</sup>Не, а также магнитные методы. Благодаря своим преимуществам рефрижераторы растворения в настоящее время являются основным средством получения температур ниже 0,3 и до 0,005 К. Они серийно производятся во многих странах, в том числе и в нашей.



## Заключение

В предлагаемой вниманию читателя книге мы рассказали о современном состоянии и перспективах развития криогеники, одного из интереснейших направлений научно-технической деятельности человека, связанной с получением и использованием очень низких температур — от 120 К ( $-153^{\circ}\text{C}$ ) и почти до абсолютного нуля.

История криогеники насчитывает чуть больше 100 лет, но широкое ее использование началось только после второй мировой войны и продолжается во все возрастающем масштабе по сегодняшний день. В настоящее время криогеника играет большую роль в науке и технике, в промышленности и сельском хозяйстве, медицине и быту, т. е. во всей нашей повседневной жизни. Трудно сейчас найти область народного хозяйства, где в той или иной степени не используются криогенные методы или продукты криогенной технологии. Многие важнейшие области применения криогеники нами описаны, но все их охватить было невозможно, так как число их велико и с каждым годом растет. Так, недавно жидкий азот стал применяться для измельчения драгоценных камней, лекарственных препаратов и некоторых видов промышленного сырья.

Многочисленные практические применения криогеники можно разделить на два основных направления, которые мы условно назовем технологическим и рефрижераторным. К первому направлению относятся различные технологические процессы, проводимые при криогенных температурах, хотя зачастую получаемые при этом конечные вещества имеют обычную, нормальную температуру.

Особенно широко криогенные технологии используются при промышленном разделении воздуха и углеводородных газовых смесей (коксового и водяного газов, а также газов крекинга и пиролиза нефтяных продуктов).

Получение из воздуха кислорода, азота и аргона, а из газовых смесей — водорода, метана, этилена и дру-

гих углеводородных газов ведется в таких крупных масштабах, что они составляют целые отрасли в химической промышленности индустриально развитых стран. Криогенным методом извлекают из природного газа и гелий, играющий столь важную роль в науке и технике. О масштабах современного получения гелия свидетельствуют следующие данные: только в США во второй половине 80-х годов производилось ежегодно более 540 млн м<sup>3</sup> гелия, причем рост потребления гелия увеличивается на 5% в год.

Использование криогенных температур является одним из наиболее универсальных способов разделения газовых изотопов. Так, в крупном промышленном масштабе путем ректификации жидкого водорода производятся дейтерий — стабильный изотоп водорода, применяемый в виде тяжелой воды в современных атомных реакторах; на использовании дейтерия основывается и получение термоядерной энергии в будущем.

Криогенные технологии играют все возрастающую роль в передаче больших количеств газа потребителям, находящимся далеко от мест их получения. Именно с целью более экономичной транспортировки производится сжижение в громадных количествах природного газа, о чем рассказано выше (в гл. 10). Увеличивается передача сжиженных газов по трубопроводам. В эксплуатации уже находятся многокилометровые трубопроводы для жидкого кислорода и разрабатываются проекты криогенных трубопроводов значительной длины для жидких гелия и водорода.

К технологическому направлению криогеники относятся и создание так называемых криогенных двигателей для ракет, самолетов и наземного транспорта. Использование в качестве компонентов топлива жидких водорода и кислорода является одним из современных путей усовершенствования ракетных двигателей для космических полетов. Жидкий водород позволяет создавать наибольшую удельную тягу по сравнению с другими видами ракетного топлива.

Жидкий кислород является хорошим окислителем и широко применяется в ракетной технике еще со времени второй мировой войны, когда немцы начали использовать жидкий кислород в ракетах типа Фау, которыми они обстреливали Лондон. Сейчас двигатели с криогенными жидкостями успешно применяются в американских ракетопосылателях «Сатурн», французских



«Ариан», советских «Энергия», а также на космических кораблях многофазового использования типа «Шаттл» и «Буран».

В связи с ограниченностью запасов нефти хорошие перспективы имеет использование в качестве моторных топлив жидкого водорода и сжиженного природного газа в авиации и автомобильном транспорте.

Во второму — рефрижераторному — направлению использования криогеники относится получение различных низкотемпературных охлаждающих средств (жидких и твердых), а также создание криорефрижераторов — устройств, вырабатывающих холод для охлаждения любых объектов в криогенной области температур. Как уже отмечалось, наиболее удобным и универсальным способом охлаждения является использование так называемых криогенных жидкостей, представляющих собой сжиженные газы с температурой кипения ниже 120 К — азот, аргон, гелий, водород, неон, метан, окись углерода. Наиболее широкое практическое распространение в качестве охлаждающих средств повсеместно получили жидкие азот и гелий. В будущем с ним, вероятно, присоединится и жидкий неон. Остальные криогенные жидкости используются только в отдельных случаях вследствие их химической активности (кислород, водород) или токсичности (окись углерода).

Наряду с криогенными жидкостями для длительного охлаждения отдельных объектов, например приемников излучения, квантовых усилителей (лазеров и лазеров), различных радиоэлектронных приборов, все чаще применяются автономные криорефрижераторы. В настоящее время разработано и серийно производится промышленными фирмами многих стран большое число различных видов криорефрижераторов, отличающихся принципом работы, рабочей температурой, габаритными размерами и холодопроизводительностью.

Наибольшее распространение получили криогенно-газовые машины на различные температуры от 80 до 15 К (см. гл. 9), а для научных исследований в области сверхнизких температур — криорефрижераторы растворения, принцип работы изложен выше (в гл. 3). В общем, для криогенного охлаждения хорошие перспективы имеют и криогенные жидкости и криорефрижераторы.

Что касается тенденций развития криогеники, то на современном этапе можно отметить два основных аспек-

та. Во-первых, создаются все более крупные установки для ожижения газов и разделения газовых смесей. Получение в одном агрегате десятков тысяч кубометров криогенных продуктов в час становится обычным делом. Продолжается замена поршневых компрессоров для сжатия газа на более эффективные турбокомпрессоры, а поршневых детандеров для расширения газа — на турбодетандеры. Резко возросли размеры и масса сверхпроводящих магнитов, которые необходимы охлаждать и поддерживать при гелиевых температурах. Так, в крупных ускорителях элементарных частиц и в МГД-регенераторах они достигают многих сотен тонн.

Отличительной чертой современных крупных криогенных установок является высокая степень автоматизации их работы, что приводит к резкому сокращению необходимого эксплуатационного персонала. Там, где раньше требовалось 4–5 человек в смену, сейчас достаточно 1–2 человек, правда более высокой квалификации.

Наряду с изготовлением очень крупных установок и охлаждающих низкотемпературных систем, идет интенсивная разработка и серийный выпуск микрокриогенных систем с полезной холодопроизводительностью от долей ватта до нескольких десятков ватт. В создании микрокриогенных рефрижераторов в последние годы достигнуты значительные успехи: уменьшились необходимые затраты энергии, габариты и вес, увеличилась надежность и ресурс непрерывной работы. В практику начинают входить и новые методы микрокриогенной техники, такие как регенеративные дроссельные системы, адсорбционные охладители, электронные охладители, использующие Пельтье и Эттингаузена и др.

Есть все основания считать, что значение криогеники, а значит, и интерес к ней будут непрерывно возрастать. Этому способствует и громадная протяженность области криогенных температур, и резкое их влияние на свойства всех веществ, что открывает большие возможности для новых научных открытий и новых технических приложений. Ярким подтверждением этого служит недавнее открытие высокотемпературной сверхпроводимости, что может привести к революционному перевороту во многих отраслях техники.

Будущее покажет, насколько эти надежды оправдаются.



Лет 15—20 назад американские эксперты в области науки ставили криогенные исследования по их важности и ожидаемым практическим результатам на третье место в перечне перспективных научных направлений, после термоядерной энергетики и решения проблемы рака (СПИД тогда не был широко распространен). Сейчас можно утверждать, что этот прогноз начинает оправдываться. Криогеника становится одним из ведущих направлений современного научно-технического прогресса.

## Литература

1. Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Изд. 3-е. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Беляков В. П. Криогенная техника и технология. М.: Энергоиздат, 1982.
3. Техника низких температур/Под ред. Е. И. Микулина, И. В. Марфениной, А. М. Архарова. М.: Энергия, 1975.
4. Ребане К. К. Энергия, энтропия, среда обитания. М.: Знание, 1985.
5. Лорнасмаа О. В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. М.: Мир, 1977.
6. Малков М. П., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б., Данилов И. Б. Выделение дейтерия из водорода методом глубокого охлаждения. М.: Госатомиздат, 1961.
7. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике/Под ред. А. Г. Зельдовича. М.: Энергоиздат, 1982.
8. Криогенные газовые машины. М.: Машиностроение, 1982.
9. Фрадков А. Б., Троцкий В. Ф. Гелиевые криостаты для физических исследований в космосе // Космич. исслед. 1974. № 6. С. 336—340.
10. Криогенная техника/Под ред. Б. И. Веркина. Киев.: Наук. думка, 1985.
11. Криохирургия/Под ред. Э. И. Канделя. М.: Медицина, 1974.
12. Грин А. К., Зинovieв В. С. Микробиогенная техника. М.: Машиностроение, 1977.



## Оглавление

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение . . . . .                                                                                            | 3  |
| Глава 1. Где и для чего используется криогеника . . . . .                                                     | 6  |
| Глава 2. Немного истории . . . . .                                                                            | 10 |
| Глава 3. Физические основы получения криогенных температур и сжижения газов . . . . .                         | 18 |
| Тепло, холод и другие понятия . . . . .                                                                       | 18 |
| Получение криогенных температур расширением сжатого газа . . . . .                                            | 22 |
| Получение криогенных температур магнитными методами . . . . .                                                 | 25 |
| Получение ультранизких криогенных температур растворением жидкого <sup>3</sup> He в <sup>4</sup> He . . . . . | 29 |
| Криогенные методы сжижения газов. Идеальный цикл ожижения . . . . .                                           | 31 |
| Глава 4. О двух криогенных «сверхъявлениях» . . . . .                                                         | 35 |
| Сверхпроводимость . . . . .                                                                                   | 35 |
| Сверхтекучесть жидкого гелия . . . . .                                                                        | 44 |
| Глава 5. Техника получения криогенных температур и сжижения газов . . . . .                                   | 48 |
| Общие соображения . . . . .                                                                                   | 48 |
| Основные холодильные циклы . . . . .                                                                          | 50 |
| Сжатие и очистка газа в криогенных установках . . . . .                                                       | 52 |
| Теплообменные аппараты криогенных установок . . . . .                                                         | 55 |
| Теплоизоляция криогенных установок . . . . .                                                                  | 60 |
| Глава 6. Криогенные установки на температурный уровень 80 К . . . . .                                         | 65 |
| Криогенные воздухоразделительные установки (ВРУ) . . . . .                                                    | 65 |
| Криогенное производство инертных газов . . . . .                                                              | 71 |
| Ожижение природного газа и извлечение из него гелия . . . . .                                                 | 75 |
| Глава 7. Криогенные установки на температурный уровень 20 К . . . . .                                         | 77 |
| Сжижение водорода и неона . . . . .                                                                           | 79 |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Выделение дейтерия из водорода криогенным методом . . . . .                               | 82  |
| Криогенные пузырьковые камеры . . . . .                                                   | 84  |
| Глава 8. Криогенные установки на температурный уровень 4 К . . . . .                      | 85  |
| Сжижение гелия . . . . .                                                                  | 86  |
| Криогенное обеспечение крупных сверхпроводящих устройств . . . . .                        | 89  |
| Глава 9. Криогенные газовые машины . . . . .                                              | 97  |
| Глава 10. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей . . . . .                       | 99  |
| Хранение криогенных жидкостей . . . . .                                                   | 100 |
| Транспортировка криогенных жидкостей . . . . .                                            | 105 |
| Глава 11. Твердые криогенанты . . . . .                                                   | 110 |
| Глава 12. Криогеника и космос . . . . .                                                   | 113 |
| Глава 13. Использование жидкого азота в народном хозяйстве, биологии и медицине . . . . . | 124 |
| Перевозка и хранение скоропортящихся продуктов . . . . .                                  | 125 |
| Криогенное хранение биологических продуктов . . . . .                                     | 127 |
| Криогенные инструменты для медицины . . . . .                                             | 130 |
| Глава 14. Как ведутся научные исследования при криогенных температурах . . . . .          | 132 |
| Заключение . . . . .                                                                      | 146 |
| Литература . . . . .                                                                      | 151 |



**Фрадков А. Б.**

Ф82 Что такое криогеника. М.: Наука. 1991.— 153 с.  
ил.— (Сер. «Наука и технический прогресс»).

ISBN 5-02-000769-2

Необычный мир криогенных температур — от 120 К (—153°С) до абсолютного нуля — обладает уникальными возможностями для научных исследований, открытия неизвестных явлений, создания принципиально новых технологических процессов и приборов. Криогеника все шире используется в металлургии и энергетике, радиотехнике и электронике, ракетной технике и космонавтике, физике, химии, биологии и других отраслях науки и новой техники.

А. Б. Фрадков — один из крупнейших в мире специалистов в области криогеники, лауреат Ленинской и Государственной премий. Фундаментальный справочник по криогенной технике, написанный доктором технических наук А. Б. Фрадковым с соавторами, является настольной книгой специалистов по криогенике во всем мире.

Книга предназначена для широкого круга читателей, интересующихся достижениями современной науки и техники.

1604090000-083  
Ф 054(02)-91 65-90 НН

ББК 22.36

Научно-популярное издание

Абрам Борисович  
Фрадков

ЧТО ТАКОЕ КРИОГЕНИКА

Утверждено к печати  
редакцией серии

«Научно-популярная литература АН СССР»

Редактор издательства

Н. Б. Прокофьева

Художник

Л. А. Рабенау

Художественный редактор

И. Д. Богачева

Технический редактор

Л. И. Куприянова

Корректоры А. Б. Васильев,

К. И. Келаскина



ИБ № 46785

Сдано в набор 18.09.90.

Подписано к печати 27.02.91

Формат 84×108/32

Бумага типографская № 1

Гарнитура обыкновенная

Печать высокая

Усл. печ. л. 8,4 Усл. кр. отт. 8,8 Уч.-изд. л. 8,1

Тираж 1000 экз. Тип. зак. 956

Цена 1 р. 70 к.

Ордена Трудового Красного Знамени

издательство «Наука»

117864 ГСП-7, Москва, В-485

Профсоюзная ул., 90.

2-я типография издательства «Наука»

121099, Москва, Г-99, Шубинский пер. 6.



ИЗДАТЕЛЬСТВО

«НАУКА»

ГОТОВЯТСЯ К ВЫХОДУ В СВЕТ КНИГИ:

Белоцерковский О. М.

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА:**

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

(Сер. «Кибернетика —

неограниченные возможности

и возможные ограничения). —

10 л.

Книга посвящена важнейшим результатам математического моделирования в аэрогидродинамике, механике твердого тела и медицине. Читатель познакомится с новыми подходами и методами вычислительной механики, с особенностями постановки и решения ряда важных задач. Вычислительная механика излагается как пример науки, последовательно реализующей современные информационные технологии, уровень развития которой определяет важные перспективы научно-технического прогресса.

Для специалистов различных областей науки и техники, преподавателей, студентов.

Безруков Н. Н.

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ВИРУСЫ.**

(Сер. Кибернетика — неограниченные

возможности и возможные ограничения)

Книга посвящена тематике, привлекающей особое внимание программистов и пользователей ПК. Авторы знакомят читателя с различными видами вирусов способами существования вирусов в ПК, в се-



тах ЭВМ и предлагают рецепты по написанию программ как лечащих другие программы, так и иммунизирующих их. Наряду с исторической справкой книга содержит обзор состояния борьбы с вирусами в настоящее время.

Для специалистов различных областей науки и техники, преподавателей, студентов.

# **Калашников В. В., Немчинов Б. В., Симонов В. М.** **ИТЬ АРИАДНЫ В ЛАБИРИНТЕ** **МОДЕЛИРОВАНИЯ.**

(Сер. «Кибернетика — неограниченные возможности и возможные ограничения»).

10 л.

Моделирование на компьютерах стало незаменимым инструментом исследования разнообразных систем. Но как пользоваться этим инструментом? Ответ на поставленный вопрос приводит к появлениям экспериментов с компьютерными моделями, а также структурных преобразований моделей. В книге рассматриваются как методологические вопросы экспериментирования с компьютерными моделями, так и практические аспекты построения соответствующего программного обеспечения.

Для специалистов различных областей науки и техники, преподавателей студентов.

## **АДРЕСА** **КНИГОТОРГОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ** **«АКАДЕМКНИГА»** **С УКАЗАНИЕМ МАГАЗИНОВ** **И ОТДЕЛОВ «КНИГА — ПОЧТОЙ»** (по состоянию на 01.01.90)

Магазины «Книга — почтой»:

252208 Киев, пр-т Правды, 80а  
197345 Ленинград, ул. Петровзводская, 7  
117393 Москва, ул. академика Пилотина, 14, корп. 2

Магазины «Академкнига»  
с указанием отделов «Книга — почтой»:

480091 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97 («Книга — почтой») 370001 Баку, ул. Коммунистическая, 51 («Книга — почтой») 232600 Вильнюс, ул. Университетского, 4 690088 Владивосток, Океанский пр-т, 140 («Книга — почтой») 320093 Диспропостровск, пр-т Гагарина, 24 («Книга — почтой») 734001 Душанбе, пр-т Ленина, 95 («Книга — почтой») 375002 Ереван, ул. Туманяна, 31 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 289 («Книга — почтой») 420043 Казань, ул. Достоевского, 53 («Книга — почтой») 252030 Киев, ул. Ленина, 42 252142 Киев, пр-т Вернадского, 79 252025 Киев, ул. Оспенко, 17 277012 Кишинев, пр-т Ленина, 148 («Книга — почтой») 343900 Краматорск Донецкой обл., ул. Марата, 1 («Книга — почтой») 660049 Краснолреск, пр-т Мира, 84 443002 Куйбышев, пр-т Ленина, 2 («Книга — почтой») 191104 Ленинград, Литейный пр-т, 57 199164 Ленинград, Таможенный пер., 2 194064 Ленинград, Тихорецкий пр-т, 4 220012 Минск, Ленинский пр-т, 72 («Книга — почтой») 103009 Москва, ул. Горького, 19а 117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7 630076 Новосибирск, Красный пр-т, 51 630090 Новосибирск, Морской пр-т, 22 («Книга — почтой») 142284 Претвино Московской обл., ул. Победы, 8 142292 Пушкино Московской обл., МР «В», 1 («Книга — почтой»)



- 620151 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137  
(«Книга — почтой»)  
700000 Ташкент, ул. Ю. Фучика, 1  
700029 Ташкент, ул. Ленина, 73  
700070 Ташкент, ул. Ш. Руставели, 43  
700185 Ташкент, ул. Дружбы народов, 6 («Книга —  
почтой»)  
634050 Томск, наб. реки Ушайки, 18  
450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 10 («Книга — почтой»)  
450025 Уфа, ул. Коммунистическая, 49  
720001 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42 («Кни-  
га — почтой»)  
310078 Харьков, ул. Чернышевского, 87 («Книга —  
почтой»)