

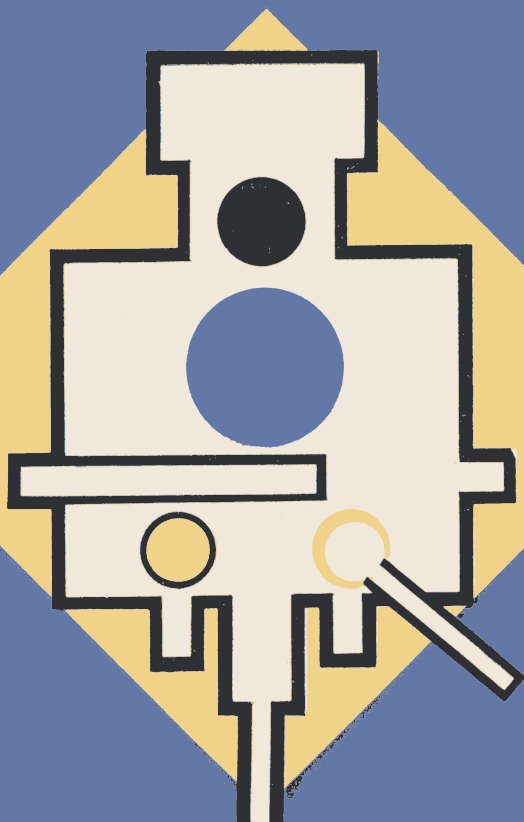
НОВОЕ  
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

8/1975

СЕРИЯ  
ТЕХНИКА

Ф. Г. Патрунов  
ИСПОЛЬЗОВА -  
НИЕ  
КРИОГЕННЫХ  
ТЕМПЕРАТУР



**Ф. Г. Патрунов,**

кандидат технических наук

# **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»**

**Москва 1975**

6Ф0.35

П20

Патрунов Ф. Г.

П20      Использование криогенных температур.  
М., «Знание», 1975.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Техника», 8. Издается ежемесячно, с 1961 г.)

Брошюра рассказывает о применении в технике низких, криогенных, температур. Описаны машины, использующие явления сверхпроводимости: коллекторные, переменного тока, трансформаторы, генераторы, МГД-генераторы. Показаны возможности сверхпроводящих линий электропередач, перспективы использования низких температур в судостроении, автомобилестроении, электронной технике, космических исследованиях, биологии, медицине.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

30 000

6Ф0.35

Криогенные температуры в технике начали использовать до второй мировой войны: из жидкого воздуха стали получать кислород, необходимый для интенсификации технологических процессов в черной металлургии, и азот для синтеза аммиака.

В послевоенные годы развитие криогеники стимулировала также космонавтика. Если раньше во всем мире ожидалось всего несколько десятков литров водорода, то с 1959 г. для нужд ракетостроения стали создавать промышленные установки, производящие в год десятки тысяч тонн жидкого водорода. Образно говоря, космические ракеты «вытянули» криогенику в самый центр научно-технического прогресса. Оборудование для получения температур от 77 К и ниже, которое еще недавно считали уникальным и использовали лишь в немногих физических лабораториях, на наших глазах стало будничным. Криогеника начала применяться и в электротехнике, радиоэлектронике, медицине, биологии и в других отраслях науки и техники.

Использование криогеники открывает перед учеными и инженерами новые перспективы: переделываются коренным образом традиционные конструкции (а иногда возвращаются к жизни полузабытые), существенно улучшаются параметры машин и технологических процессов, создаются принципиально новые, «невозможные» (как считалось раньше) машины и аппараты.

## **Сверхпроводимость и электротехника**

Прототипы современных электрических машин и других электротехнических устройств появились в конце

ХІХ в. Электрический привод быстро занял господствующее положение в хозяйстве промышленно развитых стран. Однако конструкции электрических машин и линий электропередач в своей основе до настоящего времени остались неизменными. Они лишь совершенствовались благодаря применению лучших изоляционных и конструктивных материалов, новых типов обмотки, улучшению систем охлаждения и др.

Используемым ныне электрическим машинам и линиям электропередач присущи принципиальные недостатки. Главный из них — нагрев от протекающего по проводнику тока. Нагреваются все электрические цепи и устройства: кабели, машины, аппараты. По самым скромным подсчетам не менее 20% всей вырабатываемой электроэнергии буквально выбрасывается на ветер. Беда не только в этом: нагрев ограничивает пропускную способность линий, мощность электрических машин.

А ведь как и в других отраслях техники, в энергетике постоянно увеличивается единичная мощность агрегатов. Процесс этот будет продолжаться, так как рост производства электроэнергии — тенденция постоянная. Чем выше мощность электрического генератора и паровой или гидравлической турбины, приводящей его в действие, тем ниже удельные затраты денежных средств и меньше удельный расход материалов. Исполнины электроэнергетики выгодны и в эксплуатации: они имеют более высокий коэффициент полезного действия и требуют сравнительно небольших площадей под установку.

Ныне на Славянской ГРЭС работают турбогенераторы на 800 МВт. На ленинградских заводах изготавлиется еще более мощный турбоагрегат — 1200 МВт.

По прогнозам японских футурологов, если удастся сохранить существующие темпы роста единичной мощности турбогенераторов, то к 2000 г. появится машина в 30 000 МВт. Но ленинградские инженеры, турбинисты и энергомашиностроители мыслят более трезво: следующая модель — турбогенератор в 1600 МВт — пока планируется базовой в течение нескольких десятилетий. Получить исходные материалы, изготовить гигантскую машину и даже перевезти ее к месту установки становится все труднее. Вот только один заурядный факт. Чтобы отлить заготовку в 230 т (!) для ротора турбоге-

нератора 1200 МВт, была выполнена небывалая плавка: высоколегированная сталь варилась одновременно в мартене и двух электропечах таким образом, чтобы процесс окончился синхронно и металл был бы по возможности одинакового качества.

Электрическому двигателю присущ и другой недостаток — значительная инерционность ротора. В настоящее время каждый рабочий валок блюминга приводится от машины постоянного тока предельной мощности в 6800 кВт. В определенные периоды прокатки половину своего момента он использует для обжатия металла, а другую половину ...для ускорения собственного ротора — махины в 80 т!

Чтобы сократить время реверса, некоторые зарубежные фирмы, несмотря на резкое увеличение затрат, изготавливают «прокатные» двигатели с двумя-тремя и даже четырьмя якорями на одном валу.

Инерционность ротора часто снижает эффективность работы систем автоматического управления, так как электрический двигатель оказывается в них самым медленным элементом.

В развитых промышленных странах производство электроэнергии удваивается каждые десять лет. Поистине грандиозны планы электрификации и нашей страны. Естественно, возникают сомнения: можно ли обеспечить их выполнение, если и в дальнейшем использовать только нынешние электрические машины и линии электропередач, действующие на классических законах, изученных и сформулированных корифеями электротехники. Вот почему большие надежды ученые и инженеры-электротехники связывают с использованием давно известного явления — сверхпроводимости.

**Некоторые проблемы освоения сверхпроводимости.** Из физики известно, что с понижением температуры электрическое сопротивление металлических проводниковых материалов уменьшается. Проводя соответствующие измерения, голландский ученый Каммерлинг-Оннес еще в 1911 г. обнаружил, что столбик ртути, охлажденный до температуры 4,2 К жидким гелием, полностью потерял электрическое сопротивление. Впоследствии был поставлен и такой эксперимент: периодически велись измерения в сверхпроводящей цепи — даже через год приборы не обнаружили ни малейших признаков затухания тока.

Сверхпроводимость была обнаружена также у свинца, олова, цинка, алюминия и у некоторых других металлов. Позднее такие сверхпроводники стали называться сверхпроводниками первого рода. В 1933 г. немецкие физики Мейснер и Оксенфельд обнаружили, что они идеальные диамагнетики — выталкивают из себя магнитные силовые линии. Это фундаментальное свойство сверхпроводников первого рода ныне называется эффектом Мейснера.

Открытие сверхпроводимости вызвало огромный интерес ученых и инженеров. Казалось, что электрические машины и линии могут работать без потерь энергии. Сам Каммерлинг-Оннес в 1913 г. предложил создать мощный магнит на 79,6 кА/см для физических исследований со сверхпроводящей обмоткой.

Увы, вскоре выяснилось, что даже небольшой ток, или такое слабое магнитное поле, которое создает постоянный магнит («критические параметры»), «выключали» сверхпроводимость. Так «погасили» радужные надежды физиков и электротехников.

Трудности, вставшие на пути практического освоения сверхпроводимости, длительное время казались непреодолимыми. Но приблизительно 15—20 лет назад американские и советские ученые — среди них академики Н. Н. Боголюбов, Л. Д. Ландау, член-корреспондент АН СССР А. А. Абрикосов — теоретически доказали, что некоторые сплавы и соединения могут сохранять сверхпроводимость при очень высоких критических параметрах.

В 1961 г. американский физик Кунцлер испытал предсказанный сверхпроводник второго рода — проволоку, изготовленную из сплава ниобия с оловом. По ней удалось пропустить ток с фантастической плотностью — 1000 А/мм<sup>2</sup>. Даже самый сильный электромагнит, который имелся тогда у американских ученых, не смог разрушить сверхпроводимость. Приблизительно с этого момента началось лавинообразное нарастание количества работ по прикладной сверхпроводимости. В настоящее время уже известно более тысячи сверхпроводников второго рода.

В электрических машинах и линиях используются либо гиперпроводящие обмотки и жилы (т. е. охлажденные настолько, что их электрическое сопротивление

сильно уменьшено, но все же сохраняется), либо сверхпроводящие.

Важно отметить, что сверхпроводники не оказывают никакого сопротивления только постоянному току. В цепях переменного тока потери энергии есть, они зависят от частоты тока и магнитной индукции. Относительно велики потери энергии на переменном токе в сверхпроводниках второго рода. Поэтому в настоящее время наиболее успешно осваивают сверхпроводящие цепи постоянного тока: соленоиды для создания сильных магнитных полей, обмотки возбуждения электрических машин, соответствующие кабели. Рассмотрим некоторые проблемы, связанные с эксплуатацией таких цепей.

В технической литературе уже появились сообщения о разработке сверхпроводника второго рода на основе сплава ниобий—алюминий—германий с критической температурой 20,6—21 К. К сожалению, охлаждать сверхпроводящие обмотки электрических машин пока научились только гелием. Только он остается жидкостью, когда все остальные вещества уже становятся твердыми телами.

Удержать гелий в жидком состоянии — очень непростая задача! Хотя в сверхпроводящей цепи при протекании постоянного тока не образуется тепло, оно проникает к гелию из окружающей среды через стенки криостата и особенно через вводы, соединяющие обмотку возбуждения с источником питания. Теплоприток всего в 1 Вт в течение часа испаряет около 1,5 л гелия. А стоит он недешево — 11 руб. литр, да и к тому же невозполним в природе. Поэтому используют рефрижераторные установки, которые вновь превращают газообразный гелий в жидкость.

Чтобы скомпенсировать достигший жидкого гелия ватт тепла — выработать соответствующий холод и вновь превратить газ в жидкость — холодильная установка массой в несколько десятков килограммов должна потреблять из сети 500—1000 Вт электрической мощности. Ожижение гелия обходится весьма дорого.

Гелиевая холодильная установка работает с низким КПД. Однако электроэнергия, потребляемая ею, незначительна по сравнению с электроэнергией, которая экономится при замене обыкновенной электрической цепи сверхпроводящей. Ясно, что экономичными могут быть лишь такие электрические машины и линии, в которых

теплоприток — изнутри и снаружи — к сверхпроводящим обмоткам и проводникам минимален.

В обычных электрических машинах и линиях каким-либо образом (например, посредством вентиляции или прогонкой хладагента) отводится тепло от токоведущих жил в окружающее пространство, в холодных сверхпроводящих необходимо решить обратную проблему: не допустить тепло из окружающего пространства к токоведущим жилам и гелию.

Поэтому гипер- и сверхпроводящие обмотки помещают в криостаты — устройства, минимизирующие теплопритоки к гелию извне. Они выполнены по принципу «слоеного пирога»; гелиевая ванна окружена вакуумом, затем азотная ванна, которая, в свою очередь, вновь охвачена вакуумной теплоизоляцией. Азотный экран очень эффективен: он снижает теплоприток к гелию в 200 раз.

Плотность тока в сверхпроводящей обмотке возбуждения приблизительно в 100 раз больше, чем в обычном медном проводе, и если соединить сверхпроводящую обмотку с источником питания «комнатной» температуры, то вводы должны иметь большое поперечное сечение. Но такие толстые медные проводники — это как бы открытые ворота, через которые тепло из окружающего пространства устремляется к жидкому гелию. Поэтому иногда вводы в криостат делают съёмными. По окончании запитки их заменяют тепловой изоляцией.

В сверхпроводящей обмотке циркулирует незатухающий ток, в нее «вмораживается» магнитный поток: сверхпроводящая обмотка будет создавать магнитный поток сколь угодно долго, совершенно не потребляя энергии.

В других случаях используют схемы запитки при криогенных температурах, например, с применением помещенных в криостат трансформаторов однократного или циклического действия.

Если какой-либо кусочек сверхпроводящей проволоки случайно нагреется из-за механического перемещения под воздействием электромагнитных сил или по другим причинам, то в нем возникает электрическое сопротивление. Сразу же «заработает» закон Джоуля — Ленца: начнет выделяться тепло, пропорциональное квадрату силы тока. Мгновенно нагреются соседние участки сверхпроводника, начнется лавинообразный про-

цесс, нормальная зона «разбежится» по всей обмотке. Последствия могут быть катастрофическими. Из-за огромной скорости изменения тока в обмотке наведется значительная э.д.с. самоиндукции, изоляция проводников будет пробита. Сама обмотка может сгореть от выделившегося тепла. Жидкий гелий превратится в газ, объем его увеличится в несколько сот (!) раз, давление поднимется настолько, что криостат разлетится на куски. Но даже если криостат и обмотка возбуждения уцелеют, ущерб все равно будет не мал, так как восстановить сверхпроводящее состояние можно лишь через некоторое время.

В связи с этим применяют стабилизированные сверхпроводящие обмотки. Пучок сверхпроводящих жил — от 6 до 800 — диаметром всего в несколько микрон впрессовывают в обыкновенный проводниковый материал высокой электро- и теплопроводности, например в медь. В обмотке из такого комбинированного проводника тоже, конечно, может в какой-либо точке возникнуть электрическое сопротивление. Но ток из сверхпроводящей жилы пойдет по меди, где тепло быстрее рассеивается. Причина, вызвавшая местный нагрев, исчезнет; сверхпроводящее состояние на участке восстановится. На случай, если аварийный режим все же разовьется, предусмотрены защитные меры: быстрый отвод газообразного гелия, автоматическое отключение тока в сверхпроводящей обмотке, эвакуация энергии из криостата через контуры, индуктивно связанные друг с другом.

**Коллекторные криогенные машины.** Впервые в Советском Союзе машина постоянного тока со сверхпроводящей обмоткой возбуждения (принцип ее работы такой же, как у обычной машины) была испытана в 1963 г. Особенностью данного двигателя была работа с «вмороженным» магнитным потоком.

Опишем одну из последующих экспериментальных конструкций. Машина состоит из двух частей: якоря и сверхпроводящей обмотки возбуждения. Соответственно имеются и два конструктивных узла: цилиндр из немагнитной стали, в котором размещается якорь, коллектор, щетки, подшипники, и кольцевой криостат, в нем охлаждаются погруженные прямо в гелиевую ванну катушки возбуждения из сверхпроводящего провода.

Сам криостат съемный, он «надевается» на якорь. Якорь же работает при обычной комнатной температу-

ре. Криостат соединен с холодильной установкой, которая снабжает его жидким гелием.

Сегодня практически все электрические приборы, аппараты, машины имеют ферромагнитные магнитопроводы с низким магнитным сопротивлением. Плотность тока в сверхпроводящей обмотке столь велика, что в ней создается магнитное поле, более мощное, чем в обычной машине. Магнитная индукция превышает индукцию насыщения стали, при этом сопротивление ферромагнитного материала настолько возрастает, что использование магнитопровода становится нецелесообразным. Индуктор и якорь без стали! Такая машина совершенно необычна с позиций классической электротехники. У нее есть важное преимущество по сравнению с традиционной — вес якоря, а следовательно, и момент инерции значительно снижены. Обмотка возбуждения без ферромагнитного сердечника имеет меньшую индуктивность, поэтому переходные процессы в машине ускоряются.

Опыты показали, что время разгона экспериментального коллекторного криодвигателя сократилось на одну треть по сравнению с обычной машиной. Если, например, так выполнить якорь прокатного двигателя, то момент, необходимый для разгона ротора, уменьшится в несколько раз. Солидная экономия электроэнергии в переходных режимах, надежная коммутация, увеличение срока службы благодаря более мягкой работе оборудования, сравнительно высокая производительность приводимых машин — вот преимущества использования двигателя с облегченным ротором.

Немало потрудились изобретатели в разных странах мира над созданием станков для механической укладки обмоток электрических машин. Некоторые конструкции оказались удачными. И все же на электромашиностроительных заводах до сих пор трудится целая армия работников, которые вручную укладывают обмотки. Операция оказалась слишком сложной для автоматизации: проводники надо протиснуть через узкую прорезь и плотно уложить в тесном пазу.

Обмотка якоря — да и сам якорь — криогенной машины может быть изготовлена совершенно по-иному. На автоматических станках надо изогнуть обмоточный провод по шаблонам, разместить готовую обмотку на технологическом каркасе, а затем залить пространство между проводником и валом пластмассой. В теле яко-

ря появятся каналы, необходимые для охлаждения обмотки. Просто, дешево, технологично. Испытания опытных образцов коллекторных криомашин, а также расчеты перспективных конструкций показывают, что использование сверхпроводящей обмотки возбуждения даст возможность повысить коэффициент полезного действия на 3% (с учетом работы холодильной установки), снизить удельный вес машин в 5, а объем — в 2—3 раза.

В 1811 г. Майкл Фарадей создал электрическую машину — медный диск, помещенный между полюсами подковообразного магнита. При вращении диска появляется э.д.с., которую снимают с помощью двух щеток, установленных на оси и периферии ротора. Это был первый генератор постоянного тока.

Машины такой конструкции называются униполярными. Они удивительно дешевы и просты: в них нет обмотки на якоре и коллектора, у них более высокий коэффициент полезного действия, большая перегрузочная способность, в кривой тока и напряжения отсутствуют пульсации. Они работают с очень большими токами, что иногда — правда, редко — довольно важно (для питания электромагнитов ускорителей, кондукционных насосов атомных реакторов, установок для электролиза и других целей). Униполярные машины не получили широкого распространения, так как дают очень низкое напряжение.

Этот недостаток униполярных машин можно устранить, если использовать сверхпроводящую обмотку возбуждения, создающую значительно более сильное магнитное поле, чем в обычной машине. При достаточно большой мощности сверхпроводящая конструкция оказывается и более дешевой, так показала практика. В Англии, на электростанции в Фоули для привода циркуляционного насоса с 1970 г. испытывался такой двигатель фирмы ИРД мощностью 2400 кВт. По сравнению с обычным его коэффициент полезного действия выше на 3% (с учетом холодильной установки), вес снижен в 9 раз, стоимость уменьшена на 40%. Фирмой ИРД разработаны проекты униполярного двигателя такой же конструкции на 5900 кВт и униполярного генератора мощностью 500 МВт при напряжении 1 кВ и токе 500 кА. По оценкам специалистов, мощность униполярных двигателей со сверхпроводящей обмоткой мо-

жет быть доведена до 200—250 МВт при скорости вращения якоря 1500—2000 об/мин. Расчеты советских ученых показывают, что применение криогенных двигателей постоянного тока целесообразно при мощностях, превышающих 5000—8000 кВт.

**Криогенные машины переменного тока.** Конструкторы турбогенераторов, так же как разработчики двигателей постоянного тока предельной мощности, при создании новой более мощной машины жестко стеснены ее габаритами. Из-за ограничений по поковкам и по условиям механической прочности диаметр якоря не может быть больше 120—130 см, из-за прогиба ротора под влиянием собственного веса его длина не должна превышать 14—15 м. В связи с этим предельная мощность турбогенератора приблизительно равна 1600 МВт.

Теоретические расчеты показывают, что использование сверхпроводящей обмотки позволит в габаритах, достигнутых в настоящее время, создать машину в несколько десятков или сотен раз более мощную, с высокой перегрузочной способностью. Одна из моделей турбогенератора мощностью 105 кВА, выполненная в Советском Союзе, конструктивно похожа на описанную выше коллекторную криогенную машину. Неподвижная сверхпроводящая обмотка возбуждения также помещена в кольцевой криостат, в расточке которого вращается якорь. Он из стеклотекстолита, его обмотка охлаждается парами азота. Размеры якоря: диаметр — 140 мм, активная длина — 250 мм. Теплоприток извне к гелию 2,5 Вт, КПД генератора (с учетом холодильной установки) 98%. Трехфазный ток снимали с якоря через три кольца и щетки.

Вращающийся токосъем — слабое место конструкции. В перспективе может быть построен аналогичный турбогенератор мощностью несколько десятков миллионов ватт, а при использовании ртутного токосъема — на порядок выше. Американские специалисты разработали проект турбогенератора мощностью 600 МВт с неподвижной сверхпроводящей обмоткой возбуждения. Диаметр якоря — 1 м, длина активной зоны — 2 м, ожидаемый КПД — 99,9%.

Можно ли создать сверхпроводящий турбогенератор обычной конструкции с вращающейся обмоткой возбуждения? Несмотря на большие технические трудности,

была разработана и испытана отечественная машина мощностью 18 кВт с вращающимся криостатом.

Криостат выполнен из нержавеющей стали, в нем размещена сверхпроводящая обмотка возбуждения. Через полость вала ротора подают жидкий гелий, откачивают вакуумное пространство в теплоизоляции, запитывают сверхпроводящую обмотку. Обмотка возбуждения окружена экраном, он защищает ее от переменных магнитных полей, которые наводятся якорной обмоткой. Статор представляет собой кольцевой криостат из нержавеющей стали, залитый жидким азотом, в котором размещены трехфазная медная обмотка и ферромагнитный экран.

Обмотка статора, таким образом, гиперпроводящая. Криостат статора, кроме того, играет роль дополнительного теплового экрана для ротора, что упрощает схему тепловой изоляции последнего. Испытания модели показали принципиальную осуществимость и работоспособность турбогенератора с вращающимся криостатом. Такая конструкция более перспективна, чем описанная выше. Опытная машина переменного тока на 87 кВт со сверхпроводящей обмоткой возбуждения во вращающемся криостате была испытана в Массачусетском технологическом институте (США). А американская компания WH построила синхронный генератор со сверхпроводящей обмоткой на роторе мощностью 5 МВт, при напряжении 4160 В, токе 700 А. Разрабатывается синхронный генератор такой же мощности для авиации.

Ученым и инженерам предстоит еще решить много сложных проблем при разработке мощных турбогенераторов. Так, например, необходимо через вал передать ротору значительный механический момент и в то же время ограничить теплоприток через него в холодную зону. Возможные решения: соединение ротора турбины с ротором генератора через электромагнитную муфту или изготовление вала из стеклопластика.

Весьма серьезная проблема — крепление стержней якорной обмотки при отсутствии сердечника из стали, так как в мощных машинах на них действуют значительные электромагнитные силы.

Прикидочные расчеты показывают, что турбогенератор на 1000 МВт со сверхпроводящей обмоткой возбуждения должен стоять в 3 раза дороже, чем обычный турбогенератор. Однако его КПД 99,73%, что превышает

шает КПД ныне действующих машин. Экономический фактор подразумевает достаточный уровень надежности: по расчетам американских специалистов, аварийный простой мощного турбогенератора в течение суток сводит на нет все преимущества от использования сверхпроводящих обмоток.

**Криогенные трансформаторы.** При изготовлении и транспортировке мощных трансформаторов возникают проблемы, аналогичные тем, которые описаны выше. Так, по условиям транспортировки приходится ограничивать вес и габариты трансформатора, применять однофазные конструкции вместо трехфазных, что на 20 % увеличивает расход материалов. Установленная мощность трансформаторов в 5—6 раз превышает мощность генераторов, поэтому снижение потерь в них имеет важное народнохозяйственное значение. И здесь на помощь опять приходит сверхпроводимость.

Если охлаждать не только обмотки, но и магнитопровод, то в последнем из-за уменьшения электрического сопротивления возрастут вихревые токи. По этой причине в криостат помещают лишь обмотки. В некоторых маломощных конструкциях магнитопровод заменяют сверхпроводящими экранами, которые играют роль направляющих магнитного потока. Экономия от снижения потерь мощности в обмотках должна быть выше, чем затраты на их охлаждение. Для гиперпроводящих трансформаторов целесообразно использовать обмотки из алюминиевой фольги высокой чистоты. При температуре 20 К сопротивление алюминия уменьшается в 500—1000 раз по сравнению с сопротивлением при «комнатной» температуре.

В 1966 г. в ФРГ был испытан однофазный трансформатор на 250 кВт с обмотками из алюминиевой фольги, охлаждаемыми жидким водородом. На основе экспериментов рассчитаны параметры гиперпроводящего трансформатора на 600 МВт. Габариты его бака и вес стали в нем снижены вдвое по сравнению с обычной конструкцией. Суммарные потери в гиперпроводящем трансформаторе с учетом затрат мощности на охлаждение обмоток — 731 кВт, в обычном — 2000 кВт.

В Англии была создана опытная модель сверхпроводящего трансформатора на 250 кВт. По данным фирмы «Ферранти», сверхпроводящий трансформатор мощностью 570 МВт будет весить примерно в 2 раза меньше,

чем обычный. Суммарные потери в этом трансформаторе составят 150 кВт, что, по мнению специалистов, окупит стоимость трансформатора за 2,5 года.

По расчетам советских специалистов, при использовании гиперпроводящих обмоток предельная мощность трехфазного трансформатора при существующих транспортных ограничениях может быть повышена в 3—4 раза и достигнет 1000 МВт.

Вместе с тем имеется ряд нерешенных проблем, затрудняющих использование подобных трансформаторов. Известные сверхпроводники имеют относительно большие потери в переменных магнитных полях, обмотки при коротком замыкании легко могут перейти в нормальное состояние. У них низкие индуктивности рассеяния, что повышает уровень токов короткого замыкания. Поэтому некоторые специалисты считают применение сверхпроводящих трансформаторов в настоящее время нецелесообразным.

**Другие криогенные электрические машины.** Для запитки сверхпроводящих обмоток была разработана принципиально новая электрическая машина — топологический генератор. Это криостат, в который помещены свинцовые пластинки, включенные в сверхпроводящую цепь. Над пластинками движется ротор с магнитами, его привод размещен вне криостата.

В соответствии с эффектом Мейснера пластинка в сверхпроводящем состоянии отталкивает от себя магнитные силовые линии. Но магнит создает такое поле, что под ним в некоторой зоне сверхпроводящее состояние временно разрушается. В пластинке появляется «дырка». Эта дырка реально существует, ведь через нее замыкается магнитный поток, и вместе с тем ее нет, так как материал нигде не разрушается. По мере движения магнита невидимая дырка будет скользить по пластинке, а магнитные силовые линии — вытягиваться.

В момент выхода магнита из контура весь магнитный поток «сцепится» со сверхпроводящей цепью; в ней по закону электромагнитной индукции наведется незатухающий ток, и он сохранит магнитное поле. Так, в сверхпроводящей обмотке появится постоянный ток и соответствующий магнитный поток. Нетрудно заметить, что магнит входит в цепь, нарушив ее сверхпроводимость лишь частично, а выходит из нее через другой участок, совсем не разрушая сверхпроводящего состояния.

При движении ротора с магнитами магнитный поток и ток будут периодически накачиваться в сверхпроводящую цепь. По этой причине такие генераторы иногда называют «магнитными насосами».

Движение несуществующей дырки можно создать и вращающимся магнитным полем. Так по-новому осуществляется преобразование трехфазного переменного тока в постоянный.

Парадоксально но факт: топологический генератор работает без коллектора. А ведь во многих научных трудах утверждалось, что создать машину постоянного тока без коллектора нельзя.

А вот другая «невозможная» электрическая машина — трансформатор постоянного тока. Конечно, при комнатной температуре нельзя передать энергию из одной обмотки в другую через постоянное магнитное поле, так как ток в первичной обмотке, а следовательно, и магнитный поток в магнитопроводе не меняются по величине и направлению. Лишь в момент включения, во время кратковременного переходного процесса, во вторичной обмотке возникает импульс э.д.с., который быстро затухает.

Если трансформаторные обмотки сделать сверхпроводящими, первичную соединить через выключатель с источником тока вне криостата, а вторичную замкнуть на сверхпроводящую цепь, то последствия описанного переходного процесса будут иные: импульс э.д.с., наведенный во вторичной цепи, вызовет в сверхпроводящей цепи незатухающий постоянный ток. Такой трансформатор постоянного тока однократного действия иногда используют для запитки сверхпроводящих соленоидов или обмоток.

В тех же случаях когда необходимо возбудить ток в сверхпроводящей цепи большой индуктивности, удобен циклический сверхпроводящий трансформатор. В схеме запитки имеются микроспирали — «тепловые ключи», с помощью которых на некоторых участках сверхпроводимость периодически разрушается и восстанавливается. Меняется конфигурация сверхпроводящих цепей, появляется промежуточный контур. При каждой подаче импульса из первичной цепи энергия переходит в промежуточный контур, а затем во вторичную цепь. Происходит такая же накачка тока и магнитного потока, как и при работе топологического генератора.

Электроэнергию выгодно производить непрерывно, но спрос на нее резко колеблется в течение суток. Для покрытия пиковой нагрузки устанавливают дополнительные энергетические агрегаты, сооружают гидроаккумулирующие станции. Очень нужны склады электроэнергии. В связи с этим разрабатываются индуктивные накопители энергии — сверхпроводящие магнитные системы, сконструированные так, чтобы «запасать» и хранить без потерь как можно больше энергии в магнитном поле. При равенстве запасенной энергии объем такого накопителя в 7 раз меньше, чем у конденсаторной батареи.

Одна из первых моделей индуктивного накопителя энергии была успешно испытана в 1970 г. в Институте высоких температур АН СССР. В сверхпроводящем соленоиде была накоплена энергия  $10^4$  Дж, через трехфазный инвертор она передавалась в городскую сеть переменного тока.

Среди специалистов оживленно дискутируется вопрос о возможности создания мощного сверхпроводящего индуктивного накопителя. Вот один из проектов французских энергетиков. В гигантский криостат помещена тороидальная катушка из сверхпроводника, стабилизированного медью или алюминием, средним диаметром 136 м. Круговое сечение обмотки с учетом гелиевой оболочки, азотного экрана, теплоизоляции, бандажей для крепления обмотки будет иметь диаметр 17 м. Катушка обтекается током 140 кА, плотность тока в сверхпроводнике  $3000 \text{ А/мм}^2$ , амплитудное значение магнитной индукции 7 Т. В ночное время в накопителе запасается энергия  $10^{13}$  Дж, в течение нескольких вечерних часов он может отдавать мощность, приблизительно соответствующую пиковому приращению мощности в энергосистемах Франции в настоящее время.

Одна из труднейших проблем при создании такого накопителя — механическая прочность, так как на обмотку действуют колоссальные электродинамические силы.

Использование мощных сверхпроводящих накопителей может коренным образом изменить энергетику, «развязать» источники энергии от потребителей, упростить управление, контроль и защиту энергетического оборудования.

**МГД-генераторы. Генераторы термоядерной энергии.** Как ни заманчивы перспективы создания мощных крио-

генных турбогенераторов, не следует забывать, что они предназначены для работы в весьма неэффективном технологическом цикле котел—турбина—генератор; КПД преобразования тепла в электрическую энергию не может быть выше 40—41%; практически тепловые электростанции работают с еще худшими показателями.

Поэтому в Советском Союзе и других промышленно развитых странах ведутся работы по созданию принципиально новых машин — магнитогидродинамических (МГД)-генераторов, непосредственно преобразующих тепло в электрическую энергию. Их КПД может достигать 55—60%.

Принцип действия МГД-генератора весьма прост: вместо проводников ротора, как в обычном генераторе, около полюсов магнитов движется струя электропроводящего газа. Газ должен иметь хорошую электропроводность, поэтому его превращают в плазму при температуре 2500—3000 К. Плазма соприкасается в канале генератора с электродами, которые соединены с внешней нагрузкой. Кинетическая энергия движущегося газа непосредственно превращается в электрическую энергию. Достоинство МГД-генератора — отсутствие вращающихся частей.

Одна из многих сложных проблем, возникающих перед учеными и инженерами при практической реализации МГД-принципа, — магнитная система. Расчеты показывают, что мощность, необходимая для питания магнитной системы без ферромагнитного сердечника генератора на 25 тыс. кВт, составит 20 тыс. кВт, что совершенно неприемлемо. Если же применить магнитную систему с ферромагнитным сердечником, то вес машины будет в десятки раз больше, чем у обычного турбогенератора такой же мощности. У более крупных МГД-генераторов мощность, потребляемая магнитом, относительно меньше, но все же весьма значительна.

Очевидно, что экономичный МГД-генератор может быть создан только со сверхпроводящей магнитной системой. Та же машина мощностью 25 тыс. кВт будет при таком исполнении тратить на возбуждение магнитного поля всего 100 кВт, объем магнитной системы уменьшится в 50 раз, снизится вес генератора, поднимется его КПД. В Институте высоких температур АН СССР был испытан импульсный МГД-генератор со сверхпроводящей магнитной системой. Чтобы уменьшить

расход гелия, токовводы после запитки удалялись из криостата, генератор работал с «вмороженным» магнитным потоком.

Американская фирма «Авко-Эверетт» разработала крупную стабилизированную сверхпроводящую магнитную систему (7100 кг) для МГД-генератора: напряженность магнитного поля — 29,4 кА/см, запасенная магнитная энергия —  $3,9 \cdot 10^6$  Дж.

Сверхпроводящие системы МГД-генераторов должны иметь весьма совершенную тепловую изоляцию, так как низкотемпературная область с жидким гелием располагается по соседству с каналом, в котором движется плазма, нагретая до температуры 2500—3000 К.

Химическое и тепловое загрязнение окружающей среды становится все более серьезной проблемой. Существует проект — пока он кажется фантастическим — вывести всю энергетику в космос. На синхронную орбиту высотой около 35 800 км, на которой спутник как бы висит неподвижно относительно земной поверхности, выводится энергетическое оборудование: ядерный реактор на быстрых нейтронах, МГД-генератор со сверхпроводящими обмотками, преобразователь постоянного тока в переменный сверхвысокой частоты. Электрическая энергия передается на Землю на приемную антенну в виде луча в микроволновом диапазоне. Мощность установки — 10 тыс. МВт, КПД — 37,5%. По мере необходимости ракеты с радиоактивными отходами направляются к Солнцу — у его поверхности они уничтожаются. Серия подобных ядерных МГД-генераторов, по замыслу авторов, обеспечит потребности человечества в электрической энергии.

Другие отдаленные перспективы энергетики связывают с освоением термоядерной энергии. Чтобы получить реакцию термоядерного синтеза, необходимо разогреть плазму до температуры в несколько миллионов градусов. Ясно, что никакой материал не может удержать плазму. Поэтому физики экспериментируют с различными «магнитными бутылками» и «магнитными пробками». Использование сверхпроводящих магнитных систем облегчает задачу магнитной стабилизации плазменного шнура, так как при небольших затратах мощности можно создать сильные магнитные поля. По мнению академика Л. А. Арцимовича, создать термоядерный реактор

удастся только после того, как будут освоены более мощные сверхпроводящие магниты.

Разработано несколько установок со сверхпроводящими магнитами для исследований плазмы. Одна из них имеет рабочую зону с диаметром 20 см и длиной 120 см, напряженность магнитного поля достигает 24 кА/см. Однако необходимы значительно более сильные поля. По исследованиям японских специалистов термоядерный генератор мощностью 2000 МВт должен иметь сверхпроводящий магнит с рабочим объемом 1000 м<sup>3</sup> и запасенной энергией 10<sup>11</sup> Дж. В ближайшем десятилетии, по их мнению, создание магнитов с такими параметрами станет возможным.

**Сверхпроводящие кабельные линии.** Более 80% запасов угля, газа, нефти и гидроэнергии находятся на Востоке страны, 80% потребителей электроэнергии сосредоточено в центральных районах. В европейской части гидроресурсы уже в значительной степени использованы. Если продолжить там строительство тепловых электрических станций существующими темпами, то для их работы в 2000 г. потребуется использовать весь речной сток. Будущее промышленности, транспорта и сельского хозяйства сегодня зависит от строительства атомных электростанций. Однако и они нуждаются в воде. Стало быть, уже в ближайшие годы необходимо осуществить транспорт огромных потоков энергии из Сибири в промышленные районы Центра. В недалеком будущем для создания Единой энергетической системы Советского Союза потребуются сверхмощные линии электропередач с пропускной способностью 10 тыс. МВт и выше.

В настоящее время электроэнергия передается в основном с помощью воздушных линий. Повысить эффективность работы линий можно единственным путем: поднять напряжение. Ныне эксплуатируется опытно-промышленная линия электропередачи Конаково—Москва напряжением 750 кВ. Но и такое высокое напряжение недостаточно для линии, протянувшейся на несколько тысяч километров.

Чтобы будущие транссибирские линии электропередачи работали с меньшими потерями, надо напряжение на них поднять выше, чем 1150 кВ. Но, как заявил крупный специалист по энергосистемам академик В. И. Попков, тогда «воздух перестает терпеть напряжение» — резко возрастают расходы на сооружение опор и высо-

ковольтную изоляцию. Повидимому, напряжение опор и высоковольтную изоляцию. По-видимому, напряжение 1150 кВ по этой и другим причинам близко к предельному.

У воздушных линий электропередачи есть и другие недостатки: высокая стоимость полос отчуждения; неблагоприятное воздействие на окружающую среду; недостаточная защищенность от ветра, грозы, гололеда; сравнительно низкая пропускная способность; значительные потери энергии — свыше 10%; большой расход стали и цветного металла. Иными словами, воздушные линии близки к пределу своих возможностей.

При передаче мощностей свыше 1000 МВт по подземным кабельным линиям также возникает немало сложных проблем. Приходится укладывать несколько параллельных ветвей, принудительно охлаждать токоведущие жилы электроотрицательным газом, маслом или водой, для отвода тепла орошать почву вдоль трассы. Если мощность кабельной линии 300—1000 МВт, то ее КПД не превышает 84%. Стоимость кабеля приблизительно в 10 раз выше стоимости воздушной линии.

Создание мощных сверхпроводящих линий становится все более актуальной технической задачей. Американский профессор Ричард Макфи заявил, что по сверхпроводящему кабелю толщиной в руку можно пропустить всю пиковую мощность, вырабатываемую электростанциями США. Однако возможна ли перекачка гелия, необходимого для охлаждения сверхпроводящих кабельных жил, на значительные расстояния? Ведь для кипения гелия достаточно ничтожного притока тепла.

Ученым и инженерам США удался опыт перекачки гелия на расстояние 154 км. Теоретические расчеты показали, что при совершенной тепловой изоляции можно передать жидкий гелий на несколько сот километров. В Энергетическом институте имени Г. М. Кржижановского создается двенадцатиметровый лабораторный образец сверхпроводящей кабельной линии. Модель задумана как прототип мощного трехфазного сверхпроводящего кабеля. Токоведущие жилы выполнены полыми, внутри трубок циркулирует гелий. Затем следует азотный экран и несколько слоев теплоизоляции.

Лабораторная модель оборудована необходимыми измерительными приборами, вакуумными насосами, рефрижераторной установкой, концевыми устройствами

ввода и вывода энергии, охлаждаемыми газообразным гелием, аппаратурой коммутации и защиты. Испытания показали, что потери на переменном токе при промышленной частоте достаточно малы, чтобы обеспечить выгодную передачу энергии. По лабораторному образцу может быть пропущен ток до 10 тыс. А, при напряжении 10 кВ и выше. Доказана техническая осуществимость сверхпроводящего кабеля, он может быть экономически эффективным, если теплоприток к гелиевой зоне будет не выше 0,1 Вт/м. Затраты электроэнергии на поддержание низкой температуры не превысят 1% от передаваемой мощности. Планируется построить в Москве в ближайшие годы опытно-промышленную сверхпроводящую кабельную линию.

Аналогичные модели построены и за рубежом. Так, фирма «Британские изолированные кабели» испытала трехметровый образец сверхпроводящей линии. Проводник из ниобия сечением 11 мм<sup>2</sup> рассчитан на 4000 А (в обычном исполнении сечение медной жилы составило бы 4000 мм<sup>2</sup>). Французские ученые и инженеры использовали несколько иной путь: создали модель гиперпроводящего кабеля длиной 16 м с жилами из алюминия, охлажденного до 20 К. Гиперпроводящий кабель дешевле сверхпроводящего, но работает также весьма эффективно.

Выполненный советскими специалистами технико-экономический расчет показывает, что уже при мощности 3000 МВт сверхпроводящий трехфазный кабель будет в 2—3 раза дешевле обычного. Потери энергии в нем сократятся приблизительно в 25 раз. Полная стоимость 80 км кабеля и его оснастки — 24 млн. руб. Рефрижераторы устанавливают через каждые 80 км. Отмечается и такое достоинство холодной линии: все физические процессы замкнуты внутри оболочки кабеля, воздействия на окружающую среду практически нет.

Американские ученые спроектировали комбинированную линию для одновременной передачи жидкого топлива и электроэнергии. Она протянется на 1000 км от Фаррингтона до Лос-Анджелоса. По сверхпроводящим жилам, охлажденным гелием, будет передаваться 1000 МВт, по трубам — 220 т водорода в сутки для космодрома «Белые пески» и ожиженный природный газ в количестве, удовлетворяющем 5% потребностей Калифорнии. Так как уголь будет заменен природным газом,

прекратится выброс в атмосферу 110 т сажи и 1100 т серы в сутки из котлов тепловых электрических станций; в целом экономия ожидается в 37% от общих расходов.

Сверхпроводящие кабели для передачи постоянного тока более перспективны, по ним могут быть переданы большие токи при малых напряжениях, они не оказывают никакого сопротивления проходящему току в установившихся режимах. Однако на входных концах таких линий необходимо выпрямительное оборудование для преобразования переменного тока в постоянный, на выходных — инверторное, для обратного преобразования.

Сверхпроводящие линии нужны не только для дальнего транспорта электроэнергии, но и для непосредственного ее ввода в крупные города и промышленные районы, для электроснабжения мощных электропечей, алюминиевых заводов и других энергоемких потребителей. В некоторых случаях целесообразно отказаться от трансформаторов и передавать энергию на генераторном напряжении.

Предстоит решить множество проблем: разработать концевые устройства, обеспечить герметичность кабеля, научиться монтировать его из секций, изготовленных на заводе. Очень важно совершенствовать устройства стабилизации линий, так как переход в нормальное состояние в одном месте требует отключения всей нитки. Вновь охладить линию и включить ее мгновенно нельзя. Потери из-за перерыва в электроснабжении могут быть столь велики, что сведут на нет всю экономию от использования сверхпроводимости.

**Перспективы использования сверхпроводимости в электротехнике.** Английский ученый Фрэнсис Симон сказал о сверхпроводимости: «Это та область, в которой человек существенно превзошел саму природу». Конечно, эти слова не следует понимать буквально, но в них выражено восхищение перед блистательными достижениями ученых и инженеров.

И тем не менее до серийного выпуска криогенных электрических машин и линий необходимо решить еще много сложных научно-технических проблем. Перечислим некоторые из них.

Сверхпроводники хрупки, плохо обрабатываются, имеют нестабильные характеристики, стоят пока еще непомерно дорого — почти в тысячу раз больше, чем мед-

ная проволока. Весьма важно уменьшить потери энергии в них при работе на переменном токе.

Необходимо дальнейшее совершенствование аппаратуры стабилизации сверхпроводящих магнитных систем, контроля и защиты на случай их аварийного перехода в нормальное состояние.

Так как во многих случаях криогенные электрические машины работают без ферромагнитных магнитопроводов, вокруг них возникают сильные магнитные поля рассеяния. Пока неясно, насколько они опасны для окружающего персонала. По некоторым исследованиям, человек может находиться без вреда для здоровья в магнитном поле с индукцией не выше 0,005 Т. Следовательно, криогенные электрические машины должны быть окружены защитными экранами. Их можно выполнить, например, из сверхпроводников первого рода, способных отражать магнитные потоки.

В большой энергетике вопросы экономики первостепенны: электроэнергия должна вырабатываться возможно более дешевыми способами, передаваться с меньшими потерями, использоваться эффективнее. Поэтому широкое внедрение криогенных электрических машин и кабелей станет возможным лишь тогда, когда они будут дешевле обычных.

Ключ к решению проблемы — у криогеников. До недавнего времени холодильные гелиевые установки могли работать непрерывно не более нескольких суток причем с низким КПД; кроме того, их очень сложно ремонтировать. Нужен качественный скачок криогенной техники, нужны недорогие, компактные, высокоэффективные рефрижераторы с такими же высокими показателями надежности, как у современного энергетического оборудования.

Некоторые физики-теоретики с осторожным оптимизмом предсказывают, что на основе комбинации линейных полимеров с металлами могут быть созданы «теплые сверхпроводники». Если они будут переходить в сверхпроводящее состояние при 77 К, это можно считать огромным достижением, так как жидкий гелий заменит значительно более дешевый хладагент — жидкий азот.

А если «теплые сверхпроводники» могли бы работать при «комнатных» температурах, то это означало бы подлинную научно-техническую революцию в энергетике. Академик В. Л. Гинзбург писал, что он «не очень уди-

вился бы, если бы прочел о создании высокотемпературного сверхпроводника в очередном номере физического журнала... Но не менее вероятно, что высокотемпературные сверхпроводники создать очень трудно, а в принципе и невозможно».

Однако если теплые сверхпроводники не будут созданы, электрические криогенные машины все равно появятся на сборочных конвейерах энергомашиностроительных заводов. Без сверхпроводимости уже немыслим технический прогресс в энергетике. Фронт научно-исследовательских работ быстро расширяется: многие крупные электротехнические фирмы США, Японии, ФРГ, Франции, Австрии, Швеции, Советского Союза, ГДР, Польши, Чехословакии и Румынии и других стран разрабатывают сверхпроводящие электрические машины и кабели. О размахе работ можно судить по такому факту: только в США по прикладной сверхпроводимости работает 400 фирм и организаций.

Оценивая достигнутое в настоящее время, не следует забывать, что работы по прикладной сверхпроводимости, по существу, только начинаются — они ведутся всего 10—15 лет. По мнению многих специалистов, широкое внедрение мощных сверхпроводящих электрических машин и кабельных линий начнется в 80-е годы.

## Транспорт и космические исследования

**Новые возможности судостроения.** Интересны перспективы комплексной эксплуатации электрических машин и другого оборудования, использующего явления сверхпроводимости. В будущем это, возможно, приведет к коренной переделке традиционных конструкций. Подтвердим наше высказывание на примере судостроения.

На корабле при стесненных габаритах и ограниченном водоизмещении желательно иметь легкие и компактные электрические машины для электропривода. Использование сверхпроводимости — наиболее перспективный путь решения проблемы.

Фирма IRD (Великобритания) в 1973 г. передала в эксплуатацию систему генератор—двигатель для привода мощностью 1000 кВт из униполярных машин со сверхпроводящими обмотками возбуждения. Той же

фирмой разрабатываются судовые электрические машины мощностью 40 МВт. Специалисты считают, что при применении сверхпроводящих обмоток мощность машины постоянного тока в заданном объеме можно поднять в 6—10 раз, а криогенные двигатели использовать для силового привода грузовых судов, ледоколов, танкеров водоизмещением 1 млн. т и т. д. Вес энергетической установки снижен на 14—15%, ее КПД возрос на 1—1,4%, дальность автономного плавания увеличена на 35%, значительно улучшилась маневренность корабля.

Но совершенствование судовых электроустановок не устраняет недостатков движителя с гребным винтом — сравнительно низкую возможную скорость хода и шум при работе. Теоретически более перспективен магнито-гидродинамический движитель. В нем морская вода «разгоняется» электромагнитными силами в результате взаимодействия тока, пропускаемого через нее, с магнитным полем. Однако если использовать постоянные магниты, то МГД-двигатель не эффективен из-за низкой электропроводимости морской воды; при применении электромагнитов возникают слишком большие потери в их обмотках. Поэтому хотя идея МГД-двигателя не нова, она до настоящего времени не нашла практического применения.

Лишь сверхпроводящие магнитные системы, обеспечивающие сильные магнитные поля с индукцией 10 Т и выше, делают реальным создание МГД-двигателя — бесшумного, компактного, без всяких вращающихся частей. Существует его проект (канального исполнения) для подводной лодки водоизмещением 2000 т. Проточная часть напоминает прямоугольную трубу длиной 15 м с двумя насадками: входным диффузором и выходным конфузором. К двум электродам подведено напряжение от бортового генератора; магнитное поле с индукцией 20 Т создается сверхпроводящими обмотками. Двигатель позволяет развить скорость подводной лодки до 92 км/ч.

Другое направление — бесканальные МГД-двигатели с внешним магнитным полем. На корпусе подводной лодки или подводного танкера в продольном направлении располагают замкнутый контур из сверхпроводящих проводников. На наружной части криостата со стороны воды устанавливают электроды. Поверхность корпуса

за исключением мест, где расположены электроды, покрыта электроизолирующим материалом.

При подаче напряжения от бортового генератора в морской воде между электродами начинает протекать электрический ток (перпендикулярно магнитным силовым линиям, создаваемым сверхпроводящей обмоткой возбуждения). На морскую воду действует Лоренцова сила, направленная вдоль корпуса. Вода отбрасывается электромагнитными силами, возникает сила тяги. Если использовать семь пар электродов, скорость хода достигнет 55—73 км/ч.

В Калифорнийском университете (США) была испытана модель подводной лодки длиной 3,05 м с МГД-двигателем с внешним магнитным полем. Двигатель питался от аккумуляторной батареи на борту. Электроды из алюминия, окружающие обмотку возбуждения, были защищены специальным составом от коррозионного действия морской воды. Лодка развивала скорость выше 1,8 км/ч. В перспективе можно объединить МГД-двигатель с МГД-генератором в одной установке с общей сверхпроводящей системой.

Криогенные температуры могут быть использованы не только в силовой установке, но и в приборах навигации: гироскопах со сверхпроводящими подшипниками, в радиолокаторах со сверхпроводящими резонаторами, малогабаритных ЭВМ с криотронами, в сверхчувствительных датчиках, в накопителях энергии со сверхпроводящими обмотками и в других устройствах.

**Транспорт на магнитной подушке.** Исследования показывают, что при скоростях выше 250 км/ч сцепление колеса с рельсом ненадежно, а сопротивление движению увеличивается; пассажиры плохо переносят непогашенные ускорения при прохождении кривых; возрастают вертикальные колебания. По этим и другим причинам предложены принципиально другие поезда — без колес.

Несколько лет назад началась разработка поездов на воздушной подушке, было построено несколько коротких экспериментальных линий. Опытная эксплуатация выявила их существенные недостатки: для «подвешивания» вагонов требуется весьма значительная мощность (почти такая же, какая необходима для создания тяги), вентиляторы создают большой шум, поднимают пыль и т. д.

Более перспективными считают поезда на магнитной

подвеске (особенно с использованием сверхпроводимости) с линейными электродвигателями. В связи с этим Государственный комитет Совета Министров СССР по науке и технике уделяет большое внимание форсированию научно-исследовательских работ по созданию подвижного состава на магнитной подушке.

Подобные разработки проводят и за рубежом. Так, одна из американских фирм испытала модель скоростного поезда со сверхпроводящей магнитной подвеской, выполненную в  $1/25$  натуральной величины. Модель экспресса двигалась на высоте 1 см от полотна. Тягу создают линейным синхронным двигателем. Вдоль пути уложена трехфазная обмотка, создающая бегущее магнитное поле, под вагоном размещена обмотка электромагнита ротора.

А вот один из проектов японских специалистов. На трассе Токио—Осака разгоняется линейными электродвигателями скоростной экспресс. В днище вагона находятся сверхпроводящая обмотка возбуждения, соответствующее криогенное оборудование, экраны для защиты пассажиров от мощных магнитных полей. Вдоль всего пути уложены в горизонтальной и вертикальной плоскостях замкнутые контуры из толстых алюминиевых проводников.

Скорость — 80 км/ч. Так же, как при взлете самолета, убираются резиновые колеса. Они больше не нужны, при движении экспресса в контурах наводятся столь сильные токи, что возникающие электромагнитные силы поднимают вагон на 30 см над эстакадой.

Скорость — 500 км/ч! Стремительно летящему экспрессу не страшно случайное отклонение влево—вправо или вниз—вверх, электромагнитные силы стабилизируют его положение. Всего за один час поезд на магнитной подвеске покрывает расстояние в 515 км между Токио и Осака. Его стоимость — около 3,5 млрд. долларов.

Японские инженеры уже провели первые испытания экспериментального вагона в 35 т со сверхпроводящей магнитной системой. Он движется на расстоянии в 10 см от полотна. В 1981 г. планируется пустить «настоящий» поезд на магнитной подвеске.

Скорость, бесшумность, ничтожное потребление мощности для подвешивания с помощью магнитного поля, практически неизнашиваемый «вечный» путь — вот преимущества экспресса на магнитной подушке. Интерес

но, что уже в настоящее время, когда по новому рельсовому пути между Токио и Осака поезда движутся со скоростью до 250 км/ч, подавляющее большинство пассажиров предпочитают пользоваться скоростным экспрессом, а не самолетом. На средних расстояниях (600—700 км) у быстроходных пассажирских электропоездов лучшие экономические показатели, чем у авто- и авиатранспорта.

**Камеры имитации космического пространства.** Запуск космического корабля стоит очень дорого. Американские специалисты подсчитали, что иногда выведенный на орбиту космический корабль стоит в несколько раз дороже, чем чистое золото такого же веса. Поэтому создатели космической техники стремятся еще на Земле испытать и отработать конструкции различных систем в условиях, возможно более близких к космосу.

С этой целью создают различные камеры, в которых имитируют космическое пространство. Основное оборудование камеры: вакуумпрочный корпус, насосы предварительной откачки, конденсационные крионасосы, источники излучения. Крионасосы — это развитые поверхности, охлаждаемые жидким гелием или другим хладагентом. Принцип работы конденсационного крионасоса очень прост: при температуре 4,2 К на его панели вымерзают практически все газы, имеющиеся в камере. Таким образом удастся получить сверхвысокий вакуум до  $1,33 \cdot 10^{-11}$  Па (вакуум в космосе —  $1,33 \cdot 10^{-12}$  —  $1,33 \cdot 10^{-14}$  Па).

При полете на орбите окружающее пространство поглощает практически все излучения космического корабля. Поэтому стенки камеры имеют специальные покрытия и окрашиваются в черный цвет: моделируется абсолютно черное тело.

Период работы крионасоса зависит от того, как быстро накапливается лед на охлаждаемых панелях. Через определенный интервал времени необходимо отогреть их и удалить продукты испарения.

При исследовании тепловых режимов космических кораблей недостаточно имитировать только холод и разреженность космоса. В некоторых случаях приходится моделировать Солнце и даже Луну.

Космический корабль, летящий вокруг Луны, нагревает не только Солнце, но и Луна. Днем от падающих солнечных лучей температура на поверхности Луны под-

нимается до 408 К. Так как лунное вещество плохо проводит тепло, то накопленная тепловая энергия излучается в космос в инфракрасном диапазоне волн. Вот почему интенсивность нагрева со стороны Луны может быть в 2—3 раза выше, чем со стороны Солнца.

Солнце и Луну имитируют с помощью плазменных шнуров, размещенных внутри сложных оптических систем. Чтобы излучение не падало непосредственно на панели крионасосов (для отбора тепла из камеры потребуются значительные затраты энергии в холодильных гелиевых установках), их защищают тепловыми экранами, охлаждаемыми жидким азотом.

Наиболее надежный путь изучения тепловых режимов космических аппаратов — в камерах имитации космоса. По мнению американских специалистов, исследования в них выявили не менее половины неполадок, сделали возможным поднять надежность запусков космических аппаратов за десять лет с 55 до 95%.

В последние годы наряду с конденсационными стали применяться криосоединительные насосы, принцип действия которых — криозахват неконденсирующихся газов наледью.

Крионасосы используют также в высокоскоростных аэродинамических трубах, для откачки электровакуумных приборов, при нанесении тонкопленочных покрытий, для создания высокого вакуума при научных исследованиях и в других случаях.

## Научные исследования, приборы, электроника

**Замораживание свободных радикалов.** Свободными радикалами называют осколки молекул или молекулы в электронно-возбужденном состоянии. Поскольку у них есть свободная валентность, они активные участники многих химических реакций, и хотя «живут» очень малое время, оказывают на них глубокое воздействие. Свободные радикалы участвуют в реакциях горения с кислородом (в том числе в тех, которые происходят в двигателях внутреннего сгорания), реакциях крекинга нефти, полимеризации, вулканизации каучука и многих других; в химических реакциях на Солнце и в космосе;

есть предположение, что они причастны к росту раковых опухолей.

Реакции со свободными радикалами заманчиво использовать в ракетных двигателях. Теоретические расчеты показывают, что при использовании атомарного водорода удельный импульс можно поднять приблизительно в 5 раз по сравнению с удельным импульсом при применении лучших химических топлив, размеры и вес ракет уменьшить в 10 раз.

Для управления подобными реакциями необходимо знать химическую природу свободных радикалов, их роль, процессы их рождения и гибели. Чтобы разобраться в этих вопросах, радикалы стабилизируют быстрым замораживанием до криогенных температур. «Замороженные» радикалы имеют большую продолжительность жизни, их можно исследовать различными химическими и физическими методами, например посредством электронного парамагнитного резонанса или с помощью оптической спектроскопии.

**Жидководородные пузырьковые камеры.** Широко известна камера Вильсона — «самый оригинальный и удивительный инструмент в истории науки», как ее назвал Э. Резерфорд. Она позволила физикам увидеть невидимое. Частицы, размеры которых в миллионы раз меньше миллиметра, пролетая через нее, оставляли след из капелек жидкости.

Но камера Вильсона не может зафиксировать прохождение частиц высоких энергий, которые изучают современные физики. Частицы, пройдя большой ускоритель, пронизывают эту камеру, не встречая преграды, не вызывая ядерной реакции. Кроме того, типичная камера Вильсона срабатывает один раз в 15 мин., а современные ускорители дают импульсы элементарных частиц через несколько секунд. Для исследователя необходимо, чтобы частицы встретили на своем пути плотную завесу ядер, взаимодействовали с ними, растрачивая энергию.

Принципиально новую камеру — пузырьковую, пригодную для исследования частиц высоких энергий, разработал американский физик Д. Глезер, получивший за ее создание Нобелевскую премию. Это как бы «антикамера Вильсона». Если в камере Вильсона частица оставляет след из капелек жидкости в газе, то в камере

Глезера след, наоборот, состоит из пузырьков газа, плавающих в жидкости.

Так как пузырьковая камера наполнена жидкостью, то частица вынуждена как бы продираться сквозь ядра; на ее пути перегретая жидкость вскипает. Новая камера оказалась и достаточно быстродействующей для работы с ускорителями.

В качестве «мишеней» в ускорителе желательно использовать элементарные частицы, это дает возможность изучать взаимодействие двух определенных элементарных частиц. Вот почему пузырьковые камеры часто наполняют жидким водородом. Атом водорода состоит из протона и одного электрона, вращающегося вокруг него. Однако размеры электрона много меньше, чем размеры протона, поэтому исследуемая частица практически взаимодействует только с протонами. В жидководородной камере удачно сочетается объект исследования и механизм наблюдения элементарных частиц.

В камере желательно искривить путь частицы, тогда по фотографии траектории можно измерить ее импульс и энергию. Чем быстрее движется частица, тем более сильное магнитное поле необходимо для отклонения ее от прямолинейного пути. Вот почему для воздействия на элементарные частицы устанавливают мощные электромагниты.

Современная жидководородная пузырьковая камера весьма сложное и дорогостоящее сооружение. Так, например, в настоящее время изготовлена гигантская камера, в рабочем объеме которой — цилиндре диаметром 1,6 м и длиной 4,5 м — размещено 11 м<sup>3</sup> жидкого водорода, масса самой камеры свыше 200 т. Масса магнита с алюминиевыми обмотками — 1150 т, напряженность магнитного поля — 15,9 кА/см, потребляемый ток — 16 кА. Мощность, которая превращается в бесполезное тепло в обмотках магнита камеры, к сожалению, достаточна для работы крупного машиностроительного завода.

Естественно, такие неэкономичные и громоздкие электромагниты желательно заменить сверхпроводящими, тем более что пузырьковые камеры оборудуют рефрижераторными установками для охлаждения рабочей жидкости. Подобная аппаратура уже эксплуатируется. Так, в жидководородной пузырьковой камере Аргоннской национальной лаборатории (США) использована

сверхпроводящая магнитная система. В обмотке магнита с наружным диаметром 5,3 м и внутренним 4,8 м, высотой 3 м течет ток 2,2 кА, создается магнитное поле напряженностью 1,8 Т, с запасенной энергией  $80 \cdot 10^6$  Дж.

В Резерфордской лаборатории высоких энергий разрабатывается проект сверхгигантской пузырьковой камеры с сверхпроводящим магнитом на 200 т жидкого водорода. Она будет работать с ускорителем на  $4,8 \cdot 10^{-8}$  Дж. Создаются пузырьковые камеры и с другими рабочими жидкостями: пропаном, фреоном, ксеноном, дейтерием, гелием. С их помощью изучают характеристики частиц высоких энергий.

**Другие применения сверхпроводящих магнитов.** Впервые сверхпроводящий магнит был использован для физических исследований в жидководородной пузырьковой камере. С этого момента сверхпроводящие магнитные системы при различных физических экспериментах применяют все чаще. В линейном ускорителе электронов имеется ряд объемных резонаторов, в каждом из которых электрическое поле периодически меняется. На заряженную частицу последовательно действуют ускоряющие электрические поля. Ускоритель электронов на  $1,6 \cdot 10^{-10}$  Дж должен иметь 300 резонаторов и потреблять огромную мощность 72 МВт при частоте  $10^9$  Гц.

Потери мощности можно снизить, используя сверхпроводящие резонаторы с добротностью  $10^{10}$ . Сверхпроводящий линейный ускоритель может работать непрерывно, потребляя лишь незначительную часть энергии, необходимую для обычных ускорителей.

Современные синхрофазотроны стоят дорого. Приблизительно половина стоимости приходится на магнитную систему. Проектируются синхрофазотроны на  $(0,8-1,6) \cdot 10^{-7}$  Дж, у которых магниты располагаются по окружности диаметром 2—5 км. Если использовать сверхпроводящие магнитные системы, то размеры и стоимость ускорителей такого типа удастся значительно снизить.

При испытаниях в аэродинамической трубе модели крепят растяжками, но при этом снижается точность измерений. Механическая подвеска заменяется магнитной, модель парит в магнитном поле, созданном сверхпроводящей системой, подобно легендарному гробу Магомета.

Сверхпроводящие магнитные поля можно использовать и в высокочастотных сепараторах частиц высоких энергий, для фокусировки изображения в электронном микроскопе и во многих других устройствах.

В атомной промышленности ответственный процесс — разделение изотопов различных элементов. Атомы изотопов отличаются друг от друга по массе, так как при одинаковом содержании протонов в них разное число нейтронов в ядрах. Если поместить вещество в сильное магнитное поле, то движение более тяжелых ядер будет идти по более искривленным траекториям. Используя этот принцип, можно разделить изотопы. Но процесс разделения эффективен лишь в очень мощных магнитных полях, которые целесообразно создавать с помощью сверхпроводящих магнитов.

При космических полетах космонавтов защищает от внешней радиации оболочка космического корабля: на  $1 \text{ см}^2$  поверхности приходится несколько граммов вещества. Однако при прохождении радиационных полюсов Земли, или при протонных вспышках на Солнце, которые сопровождаются сильными потоками космических лучей, такая защита недостаточна. Чтобы уберечь людей от гибели или лучевой болезни, необходимо существенно усилить радиационную защиту, использовать десятки и сотни граммов вещества на  $1 \text{ см}^2$  поверхности. Однако утяжелять космический корабль крайне нежелательно.

В связи с этим разрабатываются проекты их радиационной защиты с помощью сильных магнитных полей, создаваемых сверхпроводящими магнитами. Так, фирма «Локхид», США, изготовила сверхпроводящий соленоид с напряженностью магнитного поля  $11,9 \text{ кА/см}$  для защиты космического корабля от радиации. Масса соленоида вместе с криостатом и системой охлаждения —  $85 \text{ кг}$ , запас жидкого гелия обеспечивает работу сверхпроводящей магнитной системы в течение  $5\text{—}10$  дней.

Магнитное поле, окружающее космический корабль, может служить и гидромагнитным тормозом при его входе в плотные слои атмосферы. Так как область, в которой возможно создание магнитного поля, весьма велика, торможение будет проходить весьма эффективно.

**Эффект Джозефсона.** Английский ученый Джозефсон несколько лет назад открыл гуннельный эффект в сверхпроводниках. Суть его в том, что через тонкую пленку

окиси диэлектрика толщиной порядка  $10^{-10}$  м, разделяющую два сверхпроводника, течет незатухающий ток. Если же к этому промежутку приложить постоянное напряжение, то в цепи устанавливается переменный ток высокой частоты. Наоборот, если к джозефсоновскому переходу приложить переменный входной сигнал, на выходе возникает сигнал постоянный. Переход имеет два устойчивых состояния, максимальный сверхпроводящий ток чувствителен к магнитным полям.

На основе эффекта Джозефсона уже созданы уникальные приборы для измерения магнитного потока с точностью до  $10^{-12}$  Т (с их помощью можно, например, зафиксировать магнитное поле, создаваемое сердцем человека); напряжения с точностью до  $10^{-15}$  В; криотроны, значительно превосходящие обычные как по быстродействию, так и по уровню выходного сигнала; различные устройства СВЧ, детекторы инфракрасного излучения.

**Сверхпроводящий болометр.** Для отражения воздушного нападения средства ПВО должны на возможно более далекой дистанции обнаружить ракету или самолет противника. В наземном бою также необходимо своевременно распознать вражеский танк, пушку, ракетную установку. Одно из эффективных средств обнаружения объектов противника — детекторы инфракрасного излучения, болометры.

Известно, что все тела, нагретые выше абсолютного нуля, излучают энергию в инфракрасном диапазоне. Простейший болометр имеет фотсопротивление, которое реагирует на нагрев от инфракрасных лучей изменением проводимости. Однако его чувствительность невысока, так как сам прибор тоже излучает энергию в инфракрасном диапазоне волн, что создает шум на фотодатчике. Необходимо уменьшить уровень шумов по отношению к полезному сигналу. Чем чувствительнее болометр, тем на большем расстоянии можно обнаружить цель. По этой причине используют низкотемпературные детекторы инфракрасного излучения. Наибольшая чувствительность у сверхпроводящих болометров, охлажденных до температуры жидкого гелия.

Переход сверхпроводника первого рода из сверхпроводящего состояния в нормальное происходит скачком, производная сопротивления от температуры достигает очень больших значений. Так, олово переходит из сверхпроводящего состояния в нормальное при изменении

температуры всего на  $10^{-4}$  К, сопротивление при этом возрастает от нуля до значения «при комнатной температуре».

В зарубежной технической литературе описан сверхпроводящий болометр, охлаждаемый до температуры 3,7 К. Инфракрасные лучи через радиационный коллектор и окно попадают в блок, в котором расположен чувствительный элемент — тонкая пленка олова  $2 \times 3$  мм, напыленная на слюдяную подложку. Чувствительный элемент находится в вакууме и крепится на нейлоновых растяжках, покрытых слоем свинца. Через них пленка олова соединена с мостовой схемой, сигнал с которой идет на усилитель. Так как свинец тоже пребывает в сверхпроводящем состоянии, то чувствительный элемент в хорошем электрическом контакте со схемой, но теплоизолирован от блока. Температура внутри блока стабилизирована с точностью  $10^{-5}$  К. Чувствительность описанного сверхпроводящего болометра —  $10^{-12}$  Вт.

Подобные инфракрасные детекторы эксплуатируют и в подвижных объектах. Для их охлаждения используют специальные миниатюрные холодильные машины. Инфракрасный телескоп-спектрометр, криогенный ИТС-К, был установлен на борту советской орбитальной научной станции «Салют-4». Приемник излучения работал при температуре 50 К, он охлаждался твердым азотом в криостате КТ-7. С помощью ИТС-К летчики-космонавты А. Губарев и Г. Гречко наблюдали Землю, Луну, Сатурн, звезду Канопус, галактическое образование Магеллановы облака и др.

Инфракрасные приемники излучения применяют также для пеленгования целей; для самонаведения ракет на самолеты, корабли, наземные объекты, в картографических системах, в радиометрах, пирометрах, спектрометрах и других устройствах.

**Парамагнитные квантовые усилители.** Позади 215 дней пути в безбрежных просторах космоса. 12 марта 1974 г. советская автоматическая межпланетная станция «Марс-6» приблизилась к цели. За 48 тыс. км от Марса начался важнейший эксперимент программы: от станции отделился спускаемый аппарат. Только 5 минут прошло с момента его входа в атмосферу и до снижения на парашюте, затем радиосвязь со спускаемым аппаратом полностью прекратилась. Но за эти 5 мин была собрана бесценная научная информация: впервые в истории челове-

чества велись прямые измерения в атмосфере Марса с помощью датчиков давления, температуры, химического состава и др. Радиосигналы с данными измерений были приняты и записаны на борту межпланетной станции «Марс-6».

И вот наступает венец космической одиссеи: бортовой радиопередатчик станции «Марс-6» начинает передавать научную информацию на Землю. За 12,5 мин радиоволны преодолевают свыше 200 млн. км. Рассеивание энергии обратно пропорционально квадрату расстояния: сигнал, достигший приемной антенны земной станции дальней космической связи, ослаблен приблизительно в  $10^{25}$  раз. О таком сигнале образно говорят, что он лежит под собственными шумами приемника.

Чтобы выделить полезный сигнал, используют дорогостоящие антенны с большой площадью, уменьшают скорость передачи информации, применяют охлажденные малозумящие усилители. Расскажем о них подробнее.

В 1955 г. советские ученые — ныне академики и лауреаты Ленинской и Нобелевской премии Н. Г. Басов и А. М. Прохоров — разработали принципиально новый метод генерирования электромагнитных колебаний с помощью квантовых систем. Вскоре были созданы мазеры: квантовые генераторы и усилители радиоизлучения. Мазер работает на кристалле основного вещества, например искусственного рубина, в который добавлено небольшое количество примеси с парамагнитными свойствами. У такого кристалла, помещенного в магнитное поле, электроны в парамагнитных ионах размещаются на трех уровнях. Если электрон перейдет на уровень, более близкий к ядру, то энергия иона уменьшается.

В обычных условиях вещество поглощает столько же энергии, сколько излучает; частицы самопроизвольно переходят с одного уровня на другой, при этом наблюдается некогерентное излучение на разных частотах. Наибольшее число электронов размещается на самом низком энергетическом уровне, наименьшее — на самом высоком.

Если охладить парамагнитный кристалл до температуры жидкого гелия и подвести энергию от микроволнового генератора накачки соответствующей частоты, то на энергетических уровнях произойдет перераспределение электронов. Самый высокий уровень окажется «пе-

ренаселенным», на нем электронов станет больше, чем на среднем. В таком возбужденном состоянии ионы неустойчивы. Как только придет извне внешний электромагнитный сигнал на частоте, на которую настроен усилитель, начнется вынужденный переход электронов с верхнего уровня на нижний. Избыточная энергия выделится в виде излучения на частоте принятого сигнала, таким образом, он многократно усилится.

Важно отметить, что парамагнитный квантовый усилитель не может работать без глубокого охлаждения. При комнатных температурах нельзя стабилизировать состояние «насыщения» электронов на верхнем уровне, так как под влиянием тепловых колебаний кристаллической решетки они самопроизвольно переходят на более низкие энергетические уровни и хаотично излучают энергию, создавая шумы. Благодаря охлаждению парамагнитного кристалла до температуры 4,2 К и из-за отсутствия в нем носителей тока, шумы квантовых усилителей в сотни раз меньше, чем обычных радиоприемных установок.

Парамагнитный кристалл находится в объемном резонаторе, который помещен в криостат с жидким гелием. Для теплоизоляции используют азотный экран. Кристалл пронизывают магнитные силовые линии. Регулируя напряженность магнитного поля, изменяют энергетические уровни и тем самым частоту настройки усилителя. Для возбуждения магнитного поля все чаще привлекают сверхпроводящие магнитные системы.

Парамагнитные квантовые усилители имеют более высокую чувствительность из всех существующих. Они позволили значительно повысить дальность, эффективность и информативность космической связи, в частности, принять сигналы с автоматической межпланетной станции «Марс-6».

Рассмотрим, как устроена и как работает одна из земных станций космической связи.

Сигнал с космического летательного аппарата принимается антенной и через антенно-фидерный тракт попадает во входной блок сверхвысокой частоты (СВЧ). В нем размещены фильтры, квантовый парамагнитный усилитель, сверхпроводящие резонаторы, охлажденный параметрический усилитель — преобразователь, охлажденный смеситель, охлажденный предварительный усилитель промежуточной частоты, эталонный сверхпроводя-

ший резонатор, сверхпроводящий электромагнит парамагнитного квантового усилителя. Оборудование заключено в криостат. Для уменьшения шумов входной блок СВЧ находится непосредственно у облучателя антенны.

Принятый сигнал, пройдя антенно-фидерный тракт, усиливается парамагнитным квантовым усилителем, через параметрический усилитель-преобразователь проходит на смеситель и после преобразования через предварительный усилитель промежуточной частоты поступает на выход блока. После усиления в основном усилителе промежуточной частоты сигнал детектируется и попадает в окончательную аппаратуру.

Радиоастрономы «видят то, что вообще не видно», изучают Вселенную, исследуя приходящее на Землю электромагнитное излучение. Сигналы из космоса очень слабы. Например, поток радиоизлучения спокойного Солнца на волне 1,5 м в 200 тыс. раз слабее, чем сигнал, принимаемый от передатчика мощностью 50 Вт, удаленного на 100 км и работающего на той же частоте. Мощность радиосигнала с Юпитера — всего  $10^{-20}$  Вт. Мазеры позволили значительно уменьшить собственные шумы радиотелескопа и поднять его чувствительность на 1—2 порядка. А улучшение чувствительности даже вдвое почти в 4 раза увеличивает число доступных наблюдению объектов.

С помощью парамагнитных квантовых усилителей были получены замечательные результаты. Стало возможным исследовать естественное космическое радиоизлучение, в частности излучение межзвездного водорода: его спектральные линии имеют очень слабую интенсивность. Их удалось обнаружить и исследовать советским ученым лишь с помощью описанных устройств. Получены фундаментальные данные о строении и динамике ряда областей Галактики, удаленных от Земли на миллиарды световых лет.

Большие перспективы у нового метода радиоастрономии, основанного на независимом наблюдении источника радиоизлучения на двух удаленных на значительное расстояние друг от друга радиотелескопах (когерентная радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой). Сигналы на обоих радиотелескопах принимаются и записываются одновременно, а затем обрабатываются совместно на электронной вычислительной машине. Чем длиннее

база и короче длина волны, тем выше разрешающая способность.

...Один радиотелескоп расположен в Советском Союзе, другой — за десять тысяч километров от него, в США. Сигналы из космоса: от ядер галактик, областей образования звезд, квазаров, пульсаров и других чрезвычайно далеких объектов принимаются на волне 3,55 см. При такой длине волны и базы разрешение было около десятитысячной доли угловой секунды, выше, чем в оптических звездных интерферометрах. В обоих телескопах использовались парамагнитные квантовые усилители.

Новый метод позволит экспериментально проверить общую теорию относительности по искривлению луча электромагнитных волн под действием поля тяготения Солнца, с точностью до нескольких сантиметров зарегистрировать смещение континентов Земли, выполнить многие другие интересные и важные научные исследования.

...Передачик космической радиолокации излучает в направлении исследуемой планеты импульсы до 500—600 кВт. Достигнув цели, сигналы отражаются и принимаются радиотелескопом. Мощность отраженного сигнала ослабевает обратно пропорционально четвертой степени расстояния. А они огромны: до Венеры примерно 40 млн. км, до Меркурия — 80 млн. км, до Юпитера — 600 млн. км. Принять очень слабые сигналы стало возможным благодаря парамагнитным квантовым усилителям.

Радиолокация планет уточнила расстояние до них, помогла лучше изучить их движение, узнать о структуре их поверхности, собрать другую научную информацию.

...Города и кишлаки Памира расположены в долинах рек, которые врезаются в высочайшие горы мира. Поэтому памирцы не могут принимать телепрограммы, хотя до Душанбе сравнительно недалеко. Однако в недалеком будущем и в этой труднодоступной части страны — как уже и во многих других отдаленных местах, в которых проживает 30—35 млн. человек, — зажгутся голубые экраны. Телевизионные сигналы непосредственно с искусственного спутника связи будут поступать на приемную станцию «Орбита». Впервые в Советском Союзе искусственный спутник связи «Молния-1» был запущен

в 1965 г. Через него из Москвы в города Дальнего Востока стали передавать радио- и телевизионные программы, телефонные разговоры. Уровень сигналов, транслируемых через искусственный спутник на земную станцию космической связи, относительно слаб, так как радиоволны проходят расстояние порядка 50 тыс. км. Поэтому на приемной станции «Орбита» используют малошумящие параметрические усилители, охлаждение жидким азотом.

**Полупроводниковые лазеры.** Принцип работы лазера такой же, как у мазера, здесь также используют вынужденные колебания частиц, переходящих с более высокого энергетического уровня на более низкий. Однако в отличие от мазера лазер возбуждает электромагнитные излучения в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазоне. Электромагнитные волны лазера имеют одинаковую длину (монохроматическое излучение) и совпадают по фазе, амплитуде, направлению распространения, поляризации (когерентное излучение). Вследствие таких особенностей от лазеров можно получать лучи со сколь угодно высокой концентрацией энергии — до миллиардов ватт на квадратный сантиметр.

Лазеры широко применяются в различных отраслях науки и техники. Их используют, например, для прошивки отверстий, размерной обработки интегральных схем, закалки металлов, сварки и пайки, резания; для передачи телефонных переговоров и другой информации; для голографии; для приваривания сетчатки глаза к главному дну; в оптической памяти ЭВМ; для возбуждения управляемой термоядерной реакции в опытных установках (достигнута температура около 20 млн. К).

Среди семейства лазеров важное место занимают полупроводниковые, в которых происходит прямое преобразование энергии электрического тока в энергию электромагнитного излучения.

Инжекционный полупроводниковый лазер был создан на основе работ академиков Н. Г. Басова и А. М. Прохорова («инъекция» означает «впрыскивание»). В нем имеется кристалл арсенида галлия или фосфонид индия, охлажденный до температуры 77 К. Конструктивно лазер похож на плоскостной полупроводниковый диод. При прохождении постоянного тока электроны впрыскиваются в область электронно-дырочной проводимости, с параллельных граней кристалла, образующих резонатор,

излучается когерентный пучок света. Однако возбудить инжекционный лазер можно только при весьма высоких плотностях тока — до нескольких тысяч ампер на квадратный сантиметр. Поэтому для работы в непрерывном режиме кристалл необходимо охлаждать до криогенных температур.

Излучение полупроводникового лазера легко модулировать изменением плотности тока в кристалле: это необходимо при передаче информации по лучу. Инжекционный лазер может работать и в обратимом режиме: энергия когерентного пучка света преобразовывается в электрическую.

У некоторых полупроводниковых лазеров КПД достигает 70%, теоретически он может быть близким к 100%. Они очень компактны, просты по конструкции, могут излучать разные длины волн: от ультрафиолетовых до инфракрасных. Но пучок света полупроводникового лазера имеет большую расходимость, чем пучки света, возбуждаемые в лазерах других типов.

Мощность излучения можно повысить, если в полупроводниковом лазере для накачки использовать не электрический ток, а пучок электронов. Его направляют на полупроводник из сульфида кадмия, в перпендикулярном направлении лазер излучает зеленый свет. Кристалл охлаждают жидким гелием.

Иногда применяется охлаждение до криогенных температур и лазеров на твердом теле. Так, при лазерной локации Луны, выполненной американскими учеными, для повышения КПД лазер на рубине охлаждался до «азотной» температуры. В направлении Луны излучался импульс с энергией, равной энергии горения нескольких спичек. Луч высветил на поверхности Луны пятно диаметром 4 км. Отраженный импульс был принят через 2,5 с, он был ослаблен приблизительно в  $10^{19}$  раз. Чтобы такой незначительный сигнал можно было различить среди шумов, на приемном устройстве установили охлаждаемый фотоумножитель.

Для повышения мощности отраженного сигнала на Луне устанавливают специальные отражатели. Такой лазерно-радарный отражатель был оставлен в Море Спокойствия экипажем лунного экспедиционного отсека космического корабля «Аполлон-11». Аналогичные работы проводились и советскими учеными. Сигнал от лазера попадал на оптический уголкового отражателя на ав-

томатической лунной станции «Луноход-1», которая находилась в Море Дождей. С помощью лазеров удалось измерить расстояние от Земли до Луны с точностью до нескольких сантиметров.

**Вычислительная техника.** Электронные цифровые вычислительные машины обрабатывают информацию в двоичной системе счисления. В ней любое число представляет собой комбинацию нулей и единиц. Поэтому типовые устройства ЭВМ, такие, как триггер, разряд регистра, ячейка запоминающего устройства, должны иметь два устойчивых состояния для представления единицы или нуля.

Принцип работы сверхпроводящих цепей сам по себе таков, что имеется два устойчивых и резко отличных друг от друга состояния: наличие сверхпроводимости и ее отсутствие. Поэтому сверхпроводящие элементы уже длительное время привлекают внимание специалистов по вычислительной технике. Из многих предложенных наиболее перспективным оказался криотрон (о нем вкратце упоминалось выше) — миниатюрный переключающий элемент.

Опишем устройство крестообразного пленочного криотрона. На подложке располагается вентильная пленка из олова; поперек ее — управляющая пленка из свинца. Обе пленки изолированы друг от друга. Их температура 3,5 К. При отсутствии тока в управляющей пленке обе цепи находятся в сверхпроводящем состоянии. Олово теряет сверхпроводимость при меньших магнитных полях, чем свинец. Поэтому при появлении тока в управляющей пленке вентильная переходит в нормальное состояние под воздействием образовавшегося магнитного потока (управляющая пленка при этом остается сверхпроводящей). Время переключения криотрона порядка 10 нс. Его размеры весьма малы. При совершенной технологии на 1 см<sup>2</sup> можно разместить несколько тысяч плоских криотронов.

Из двух криотронов, соединенных крест-накрест, можно выполнить триггер. В нем две цепи: управляющая пленка первого криотрона — вентиль второго и вентиль первого криотрона — управляющая пленка второго. Такой триггер непременно займет одно из двух устойчивых состояний, соответствующих представлению 1 или 0. Например, при хранении 1 ток, протекающий по цепи управляющая пленка первого криотрона — вен-

тиль второго, разрушит сверхпроводимость в вентиле первого. В другой цепи ток будет во много раз меньше, так как в ней имеется участок с нормальным сопротивлением. Такое состояние триггера продолжится неопределенно долго, пока не придет новый управляющий сигнал.

Один криотрон может управлять без всяких промежуточных схем другим криотроном.

Криотрон универсален: на его основе можно выполнить самые разнообразные логические схемы. Но особенно удобен он в запоминающих устройствах. При сигнале 1 он переключает ячейку таким образом, что в ней появляется незатухающий ток, при этом энергия от источника совершенно не потребляется (если не считать весьма небольших затрат, необходимых для работы холодильной гелиевой установки).

Достоинства криотрона: простота, технологичность, надежность, миниатюрность, дешевизна, быстроедействие, малый уровень управляющих сигналов. Недостатки: необходимость глубокого охлаждения, малый выходной сигнал. На криотронах выполнены макеты адресных и ассоциативных запоминающих устройств. По мнению американских специалистов, емкость запоминающего устройства, выполненного на этих элементах, может достигать  $10^9$  бит.

## Водород — универсальное топливо?

Водород — топливо для ракет. В 1903 г. вышла в свет книга основоположника космонавтики К. Э. Циолковского «Исследование мировых пространств ракетными приборами». В ней ученый описывал жидкостный ракетный двигатель, работающий на ожиженных газах: водороде и кислороде. Прошло всего 66 лет, и замечательное предвидение К. Э. Циолковского сбылось! Ракета «Сатурн-5», в баках которой наряду с другим горючим имелся ожиженный водород и окислитель — ожиженный кислород, вывела корабль «Аполлон-11» на окололунную орбиту.

Важная характеристика ракетного горючего — удельный импульс (удельная тяга): отношение силы тяги к единице массового расхода топлива. Удельный им-

пульс тем больше, чем выше температура в камере сгорания и меньше молекулярная масса топлива. Так как водород имеет наименьшую молекулярную массу, то удельная тяга при использовании его как горючего и кислорода как окислителя весьма высока. А повышение удельного импульса только на 1% увеличивает дальность полета ракеты на активном участке на 6%, или дает возможность повысить полезную нагрузку на 9%.

Для сравнения приведем следующие показатели: удельный импульс для твердых топлив —  $2450 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{кг}}$ , для водорода и кислорода —  $3900 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{кг}}$  (еще выше —  $4100 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{кг}}$  была бы удельная тяга при использовании в качестве окислителя фтора, однако работа с ним опасна из-за высокой активности и токсичности этого элемента). При подогреве водорода в ядерном реакторе можно увеличить удельный импульс до  $10 \text{ тыс.} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{кг}}$ . Однако ядерный ракетный двигатель пока еще слишком тяжел.

Плотность газообразного водорода при 273 К и нормальном давлении —  $0,09 \text{ кг/м}^3$ , плотность сжиженного водорода при 20,4 К и том же давлении —  $70 \text{ кг/м}^3$ , что в 780 раз больше. Несложные расчеты показывают, что сосуд для хранения газообразного водорода под давлением был бы в 575 раз тяжелее, чем сосуд, в котором хранится такое же количество жидкого водорода. Вот почему водород на борту ракет находится в жидком состоянии при низкой температуре. По тем же причинам используют ожиженный кислород.

Ведутся работы по использованию в качестве ракетного горючего «шуги» — смеси жидкой и твердой фаз водорода; она на 12% более плотна, чем жидкий водород.

Из-за малой плотности водородное горючее применяется только в верхних ступенях ракет. Так, в упомянутой ракете «Сатурн-5» двигатели первой ступени работали на керосине и кислороде, второй и третьей — на водороде и кислороде. В топливных баках второй ступени хранилось 363 т, третьей ступени — 105 т жидкого кислорода и водорода.

Жидкие водород и кислород из вспомогательного блока космического корабля «Аполлон» использовали в

трех 110 килограммовых топливных элементах «Бэкон» высотой 1,12 м, диаметром 0,56 м. В них происходил процесс прямого преобразования энергии химической реакции между водородом и кислородом в электрическую. Топливные элементы снабжали электроэнергией отсек экипажа и давали некоторое количество питьевой воды для космонавтов. А два баллона с жидким гелием даже побывали на поверхности Луны! Гелий использовался в лунном экспедиционном отсеке для вытеснения топлива при работе реактивных двигателей отсека. Бак с жидким гелием во время пребывания американских космонавтов на Луне нагревался — по этой и другим причинам люди могли находиться на Луне не более 48 ч.

Большие массы горючего и окислителя необходимо охладить до криогенных температур, хранить с приемлемыми потерями, заправить ими баки ракет, использовать в условиях невесомости. Рассмотрим, чисто теоретически, как решаются некоторые проблемы хранения и заправки ракет низкотемпературным топливом.

Если из-за притока тепла жидкий водород начнет испаряться, то давление в емкости или трубопроводе может подняться до опасного значения. Поэтому емкости и трубопроводы оборудуют предохранительными клапанами, при их срабатывании газ выбрасывается либо в атмосферу, либо в систему удаления испарившегося водорода. Для выравнивания температуры жидкий водород перемешивают и время от времени перекачивают по кольцу, включающему в себя емкости и теплообменники холодильных установок. Во избежание разрывов трубопроводов от температурных напряжений в них устанавливают температурные компенсаторы.

Если в жидкости растворен газ, то на участках с пониженным давлением он выделяется в виде пузырей и значительно увеличивает гидравлическое сопротивление трубопровода. Особенно опасно это явление в невесомости (где нет четкой границы между жидкостью и газом) — может отказать какой-либо двигатель. Поэтому охлажденное ракетное горючее перед заправкой подвергают деаэрации. В емкость с горючим через коллектор поступает гелий. Пройдя через толщу, он уходит в дренажный трубопровод, увлекая с собой газ, который находился в пространстве над жидкостью. Постепенно кислород и азот заменяются гелием, который растворяется в жидкости плохо.

Жидкий водород и жидкий кислород нельзя сразу направить из емкости в баки ракеты, так как заправочный трубопровод и сами баки слишком теплы. Охлажденная жидкость в них превратилась бы в газ. Поэтому сначала через топливные баки прокачивают хладагент. Во время заправки непрерывно контролируют давление и температуру горючего и окислителя. Особое внимание уделяют точности дозирования, так как траектория полета рассчитана на определенный стартовый вес.

Заправка окончена. Но еще какое-то время идут предстартовые работы. Если произойдет задержка, то горючее и окислитель в баках ракеты начнут нагреваться от тепла, притекающего извне. Стенки баков имеют тепловую изоляцию, например многослойные экраны — до 60 слоев на сантиметр, помещенные в вакуум. Тепловой поток обратно пропорционален числу экранов. Такая «суперизоляция» с минимальным весом не рассчитана на сколь-либо длительное хранение низкотемпературных жидкостей на Земле (а в космосе условия совсем иные). Поэтому, чтобы выровнять температуру в баках, горючее (или окислитель) барботируют, через него пропускают жидкий гелий. Если температура продолжает повышаться, приходится частично сливать нагревшееся горючее (или окислитель) и добавлять более охлажденное. При этом необходимо вновь проверять вес топлива. Практически в предстартовый период иногда приходится несколько раз корректировать температуру и уровень горючего и окислителя.

**Водород — топливо для транспорта ...1968 год.** В Институте теоретической и прикладной механики Сибирского отделения АН СССР под руководством академика В. В. Струминского идут сравнительные испытания автомобильного двигателя ГАЗ-652 на бензине и на водороде.

...1972 год. На полигоне фирмы «Дженерал моторс» (США) выстраиваются 63 экспериментальных автомобиля, созданных студентами технических вузов, участвующих в конкурсе на лучшую конструкцию машины для города. Испытываются автомобили, использующие различное горючее, каждый двигатель проверяется на чистоту отработанных газов. Первое место было присуждено «Фольксвагену» с почти обычным, лишь незначительно переделанным двигателем, работающим на жидком водороде.

Каждый год автомобили выбрасывают в атмосферу 115 млн. т окиси углерода, свыше 1 млн. т окиси серы, десятки миллионов тонн окислов азота и несгоревших углеводородов.

А проба от двигателя «Фольксвагена», победившего на конкурсе, показала, что выбрасывается газ более чистый, чем ...воздух, который засасывался в карбюратор. При сгорании водорода образовалась вода и ничего больше! (В будущем так, возможно, будут получать и пресную воду, недостаток которой все более ощущается во многих районах земного шара.)

Работа без загрязнения атмосферы не единственное, хотя и чрезвычайно важное преимущество двигателя на водородном горючем. Автомобили потребляют огромное количество бензина, который получают из нефти — ценнейшего энергетического и химического сырья. Великий русский ученый Д. И. Менделеев справедливо указывал, что сжигать нефть все равно, что топить печь ассигнациями. Из нефти изготовляют огромное количество веществ: синтетические материалы, смазочные масла, лекарства, ароматические соединения; из нефтепродуктов можно получить искусственные белки, пригодные для откорма скота. За последнее время цены на нефть поднялись на мировом рынке примерно в 4 раза. Запасы ее невозполнимы, по расчетам некоторых ученых, их хватит только на несколько десятилетий. Естественно, в будущем придется использовать на транспорте какое-то другое топливо. Водород же широко распространен в природе: его запасы в воде океанов и морей практически неисчерпаемы. Есть он и в космосе. Сравнительные испытания автомобилей, о которых рассказывалось выше, показали, что обычные двигатели отлично работают на водородном горючем, имеют большой КПД, меньше нагреваются. Известно, как трудно запустить бензиновый двигатель зимой при сильном морозе. Пары бензина не поступают в двигатель. Эксплуатация автомобилей в суровых условиях Крайнего Севера весьма сложна: применяют различные приспособления. Водородный двигатель запускается много легче, ведь при любом морозе жидкий водород испаряется.

Водород калорийнее бензина, стало быть, водородное топливо перспективно и для авиации: уменьшится взлетный вес самолетов, увеличится коммерческая нагрузка. Расчеты показывают, что эффективность пассажирских

лайнеров возрастет в несколько раз. Водородное горючее позволит сделать новый рывок в развитии авиации — увеличить скорость транспортных и пассажирских самолетов до 10—12 тыс. км/ч. Жидкий водород можно к тому же использовать не только как горючее, но и как эффективный хладагент.

Но путь к широкому использованию водородного горючего на транспорте не близок. Вот некоторые проблемы.

Ожиженный водород значительно легче бензина, его плотность всего 7% от плотности воды, поэтому емкость баков необходимо увеличить в несколько раз.

Чтобы удержать водород в жидком состоянии при температуре 20 К, бортовые топливные баки и баки заправочных станций необходимо окружить совершенной теплоизоляцией, например экранно-вакуумной. При длительном хранении придется использовать и рефрижераторные установки. Вот почему, вероятно, водородное горючее будет использоваться сначала на самолетах, кораблях, поездах, междугородных автобусах, а затем уже на грузовых и легковых автомобилях.

Некоторые опыты по использованию охлажденного топлива на автобусах проводятся уже сегодня. Советские и венгерские специалисты работают над газовым двигателем для автобуса «Икарус-260» на ожиженном природном газе с температурой 113 К. Одной заправки достаточно для пробега свыше 500 км.

Люди старшего поколения еще помнят гибель дирижабля «Гинденбург» в 1937 г. В его оболочку, наполненную водородом, проник воздух, образовался гремучий газ, произошел взрыв и, как результат, пожар. Американские студенты, сконструировавшие экспериментальные автомобили, считают, что при выполнении должных мер предосторожности водород не опаснее бензина. До применения электрических лампочек в уличных фонарях многих крупных городов горел «свильный газ», в котором было много водорода. За многие десятилетия не произошло никаких взрывов.

При появлении первых автомобилей считалось, что их бензобаки представляют такую же опасность, как взрывчатка. Вероятно, знания и опыт сделают водородные двигатели не более опасными, чем бензиновые. Очевидно, что топливные баки, заправочные трубопроводы, топливная аппаратура водородных двигателей должны быть

тщательно герметизированы и снабжены предохранительными устройствами.

Есть и принципиально другой путь использования водорода на транспорте. В последние годы предпринимаются значительные усилия для создания электромобиля. Пока эта машина по дальности пробега и по скорости не может конкурировать с обычным автомобилем, так как у существующих аккумуляторов большой вес и недостаточная энергоемкость. Но если топливные элементы могут эффективно работать в космосе, то почему бы их не использовать на Земле, например для снабжения автомобиля энергией? У них весьма высокий КПД — до 70%, они бесшумны, не имеют вращающихся частей, не выделяют в атмосферу вредных веществ: при их работе образуется обыкновенная вода. Их энергоемкость в 5—6 раз больше, чем у аккумуляторов. К сожалению, пока они очень дороги и громоздки.

Успехи в использовании водорода в ракетах, двигателях внутреннего сгорания, топливных элементах открыли широкие и заманчивые перспективы его применения как универсального горючего. На страницах научно-технических журналов и в широкой печати дискутируются проблемы «водородной энергетики». В настоящее время водород добывают главным образом из природного газа, угля, нефти; при равной энергоемкости он стоит в 2 раза дороже бензина. В будущем огромное количество дешевого водорода получат в результате химических реакций с железоуглеродными катализаторами, при подземной газификации углей, либо, что более вероятно, электролизом воды. При разложении воды выделяется также и кислород, в котором нуждаются многие отрасли народного хозяйства.

Попутно с производством водорода можно будет накапливать и дейтерий — топливо для термоядерных реакторов: недорогой электрический ток для процесса дадут мощные ядерные электростанции, расположенные на побережье морей и оксанов или на островах. Отсюда по трубопроводам водород направят на промышленные предприятия, в мощные рефрижераторные установки для ожижения, в емкости и естественные подземные хранилища, на электростанции, где с помощью высокотемпературных топливных элементов с КПД, близким к 100%, вновь будет получен электрический ток. По мнению некоторых ученых, потери энергии при выработке,

транспортировке и использовании водорода будут меньшими, чем в существующих энергосистемах.

Возможность накопления, хранения и использования водорода по мере надобностей — весьма ценное преимущество обсуждаемых проектов. Ведь ныне вся вырабатываемая электроэнергия тут же потребляется, для покрытия пиков нагрузки приходится иметь резервные энергетические мощности.

В Лондоне уже разработан проект ликвидации городской электрической сети. По мысли авторов, в каждом доме будет установлен топливный элемент, работающий на водороде, это же горючее используют в газовых приборах. В Фармингтоне (США) даже построен дом, который не подключили к электросети... в ожидании скорых перемен. Но большинство зарубежных ученых считают, что только через 50 лет водородная энергетика обеспечит потребности нашего общества. К тому же, оценивая будущее водородной энергетики, не следует забывать, что ей, вероятно, придется конкурировать не с нынешними традиционными электрическими машинами и линиями, а со сверхпроводящими.

В этой же главе следует упомянуть и о некоторых сходных приемах использования криогеники для промышленного разделения воздуха и других газов.

**Разделение воздуха.** В промышленности наиболее освоено использование криогенных температур для разделения воздуха с тем, чтобы извлечь из него в больших количествах кислород, азот, инертные газы. Так, в отечественной установке БР-2 из жидкого воздуха низкотемпературной ректификацией вырабатывают 35 тыс. м<sup>3</sup>/ч кислорода. Разрабатывается более мощная установка на 65 тыс. м<sup>3</sup>/ч технологического кислорода. Попутно с кислородом на установках разделения воздуха получают азот и инертные газы.

Очень много кислорода расходуется при выплавке чугуна и цветных металлов, при конверторном производстве стали, для сварки и резки металлов, при огневом бурении, в микробиологической промышленности, для получения азотной и серной кислоты, при выработке ацетилена, при производстве взрывчатых веществ, в качестве окислителя в ракетных двигателях, в системах жизнеобеспечения в высотных и космических полетах и при подводном плавании, в кислородных палатках в больницах.

Кислород нужен для интенсификации производства, при его использовании процессы в конверторе ускоряются в несколько раз, повышается качество стали. В недалекой перспективе весь чугун и сталь будут выплавляться с использованием кислорода.

Об эффективности его применения в черной металлургии можно судить и по такому факту: одна машина огневой зачистки слабов заменяет 450 рабочих.

На отечественной установке БР-9 за сутки извлекается 350—400 тыс. м<sup>3</sup> азота и 290—300 тыс. м<sup>3</sup> технологического кислорода. Азот используется для синтеза аммиака — основного продукта при производстве азотной кислоты и азотных удобрений. С помощью криогенных температур выделяют гелий из природного газа, разделяют коксовый газ для получения этилена и азотно-водородной смеси, разделяют газы, выделяющиеся при крекинге и пиролизе нефти, и т. д.

**Хранение и транспортировка промышленных газов.** К промышленным газам относятся кислород, водород, азот, метан, гелий, неон, аргон, криптон, ксенон и некоторые другие. При нормальном давлении они занимают объем в 600—800 раз больше, чем в сжиженном. Поэтому хранение и транспортировка промышленных газов в больших количествах в газообразном состоянии нецелесообразны.

Так, например, для хранения 85 тыс. м<sup>3</sup> газообразного кислорода при нормальных условиях в сжиженном состоянии достаточно емкость в 100 м<sup>3</sup>. Если же хранить то же количество кислорода под давлением в 14,7 МПа, то потребуется 14 200 баллонов по 40 л.

Важное место в международной торговле занимает природный газ. Некоторые его месторождения содержат в основном метан. Перевозить метан в газообразном состоянии на кораблях практически невозможно. Если сжать природный газ до 19,6 МПа, то его объем уменьшится в 200 раз, стенки танков, рассчитанные на такое давление, будут весьма толстыми и тяжелыми. Если же метан охладить, то его объем уменьшится в 1000 раз. Для перевозки жидкого метана используют специальные танкеры емкостью до 120 тыс. м<sup>3</sup>.

Жидкий воздух оказался целесообразным использовать и в дыхательном аппарате, который можно применить, например, при подводном плавании. При том же весе запас воздуха в нем увеличен в несколько раз по

сравнению с аппаратом, использующим воздух в газообразном состоянии.

**Получение дейтерия.** Атомные электростанции используют большое количество тяжелой воды, которая применяется как замедлитель нейтронов и теплоноситель. Поэтому необходимо в промышленных масштабах получать дейтерий — тяжелый изотоп водорода. В будущем дейтерий будет работать и в термоядерных энергетических установках. Однако содержание его в обычном водороде всего  $1/6400$ . Существует несколько методов извлечения, из них наиболее перспективна низкотемпературная ректификация, впервые осуществленная в Советском Союзе.

Тщательно очищенный от примесей охлажденный водород поступает в ректификационные колонны. Так как соединение, в виде которого присутствует дейтерий в водороде, имеет температуру кипения на  $1,75^\circ$  выше температуры кипения водорода, то на тарелках колонны образуется обогащенный концентрат. В химическом реакторе соединение разлагается, в последней ректификационной колонне выделяется дейтерий. При сжигании дейтерия с кислородом получают тяжелую воду. Низкотемпературная ректификация требует расхода 3000—5000 кВт · ч на 1 кг тяжелой воды.

## **Системы глубокого охлаждения в медицине и биологии**

В последние годы благодаря развитию криогенной техники врачи получили специализированный инструмент для строго направленного, дозированного, контролируемого воздействия низкой температуры на очаг заболевания и холодильное оборудование для длительного хранения биологических материалов.

Ознакомимся, например, с криодеструктором небных миндалин, созданным учеными Института физических проблем АН СССР в содружестве с медиками («деструкция» означает «разрушение»). Криодеструктор состоит из активного медного наконечника эллипсоидной формы; холодопровода с тепловой изоляцией, резервуара из пенопласта, в который заливают 100 мл жидкого азота; отопрвателя в виде спирали в активном наконечнике.

Хирург вводит инструмент в горло больного теплым, прикасается к миндалине активным наконечником. Достаточно приподнять резервуар, и жидкий азот самостоятельно через холодопровод поступит в активный наконечник. Низкая температура воздействует на больную ткань, образующиеся ледяные кристаллики разрывают и разрушают ее, мелкие кровеносные сосуды тромбируются. Чтобы криовоздействие не распространялось на здоровые ткани, тыл и бока активного наконечника защищены изоляционным чехлом из пенопласта. Бывает миндалина примораживается к инструменту, в этом случае хирург кнопкой присоединяет спираль отоплителя к источнику тока, активный наконечник быстро становится теплым. Сеанс криовоздействия длится 3,5—5 мин. Через два-три часа больной уже может принимать пищу. Обычно требуется 3—4 сеанса для разрушения каждой миндалины.

Иногда криооперация показана тем больным, которые из-за других заболеваний не могут перенести обычное хирургическое вмешательство. Так, для радикального лечения хронического тонзиллита требуется удалить миндалины. Но лица, страдающие, кроме того, сердечно-сосудистыми болезнями, гипертонией, заболеваниями почек, пониженной свертываемостью крови, не могут быть подвергнуты этой операции. А криовоздействие эти больные переносят, как правило, без обострения сопутствующего заболевания. Эксперименты на собаках и накопленный опыт пробных операций показывают следующие преимущества криоопераций: простота, доступность (что позволяет часто выполнять криовоздействия в условиях поликлиники, а не больницы), отсутствие кровотечения, сравнительная безболезненность, незначительная травматичность и т. д.

Криолечение успешно используется для остановки кровотечений, удаления полипов, лечения опухолей, вазомоторного ринита, гипертрофического фарингита и других заболеваний. Локальное замораживание — эффективный и щадящий метод лечения лорорганов. В некоторых случаях капли криогенной жидкости непосредственно подводятся к очагу заболевания, и он разрушается.

В 1959 г. польский врач Крвавич предложил использовать криоинструмент для удаления катаракты. Низкие температуры применяются при лечении глаукомы, забо-

леваниях роговицы, отслойке сетчатки. В качестве хладагента в криоаппликаторах («аппликация» означает «наложение») используется смесь снега уголекислоты с 96% этиловым спиртом. На операционном поле хирург выполняет от 6 до 12 прикосновений к склере.

При удалении катаракты наконечник криоинструмента может приморозиться к радужке или краям раны. Поэтому в некоторых моделях криоэкстрактор («экстракция» означает «извлечение») имеется нагреватель из нихромовой проволоки, который может быть присоединен в случае необходимости к понижающему трансформатору. После оттаивания наконечника он вновь замораживается, поскольку имеется запас снега угольной кислоты в чехле криоинструмента. Хирург может продолжать операцию — приморозить и удалить помутненный хрусталик.

В большинстве случаев криовоздействия снимают боли при болезненной глаукоме, понижается внутриглазное давление. Простота метода, благоприятный исход, отсутствие серьезных осложнений, хороший косметический эффект привлекли внимание к этим операциям офтальмохирургов.

Ученые из Института физических проблем во главе с членом-корреспондентом АН СССР А. И. Шальниковым разработали несколько моделей криоинструмента. Для нейрохирургических операций по самой совершенной технологии, включая сварку электронным лучом, изготовлен специальный прибор КДН-8. Это тонкая металлическая трубка (канюля) и резервуар с 50 см<sup>3</sup> жидкого азота. Внутри канюли расположен холодопровод, в трубке создан вакуум, который необходим для тепловой изоляции. Длина рабочей части канюли — 124 мм, диаметр — 2 мм, масса инструмента — всего 100 г.

Канюля вводится в заданную точку, расположенную в глубоких подкорковых структурах головного мозга. При подаче жидкого азота внешние стенки металлической трубки остаются теплыми, однако на конце канюли возникает низкая температура. Образуется «ледяной шар» диаметром 2—12 мм. После выкипания азота оттаявшая мозговая ткань гибнет. Уже выполнено свыше 750 операций на глубоких структурах головного мозга. Так лечат и болезнь Паркинсона, торсионную дистонию, атетоз, спастическую кривошею, тяжелые болевые синдромы.

Низкими температурами воздействуют также на злокачественные опухоли головного мозга и шеи. Иногда замороженную ткань не надо удалять, после гибели клеток она рассасывается. В некоторых случаях удалось излечить больных, которым общепринятые меры не помогли. Интенсивно разрабатываются криохирургические операции в гинекологии, урологии, онкологии и других отраслях медицины. Созданы универсальные криоинструменты: канюля, зажим, пинцет.

**Хранение биопродуктов.** Это случилось приблизительно 20 лет назад в одной из европейских стран. При аварии атомного реактора пятеро физиков — среди них одна женщина — получили сильные дозы облучения. Казалось, что люди обречены на гибель от лучевой болезни. Но в больнице им был немедленно пересажен от доноров костный мозг, клетки которого вырабатывают кровь. Люди были спасены, а женщина впоследствии родила здорового ребенка.

К сожалению, донорский костный мозг при плюсовых температурах нельзя хранить долго. Уже на пятнадцатые сутки в кроветворной ткани не остается ни одной живой клетки. Стало быть, необходимо иметь запас пригодного к употреблению костного мозга, ядросодержащих клеток крови и других тканей.

...Лаборатория консервирования и трансплантации костного мозга Института переливания крови Министерства здравоохранения УССР. Здесь уже свыше 10 лет при температуре жидкого азота хранятся ампулы с костным мозгом. Такой длительный срок еще не освоен ни одним медицинским учреждением в мире. Проведенная ревизия показала, что большое количество клеток кроветворных тканей по-прежнему жизнедеятельны.

Низкая температура через криоинструмент в руках хирурга губит больную ткань. Та же низкая температура, используемая в аппаратах программного замораживания, консервирует здоровую ткань. Такое действие холода — пример диалектического единства противоположностей.

Чтобы внутри клеток из-за замерзания воды не образовывались кристаллы льда, разрушающие ткань, биоматериалы перед охлаждением погружают в защитную среду. Сначала костный мозг замораживали в слабом растворе глицерина. Глицерин проникает в клетки, не разрушая их; при охлаждении препятствует сплошному

льдообразованию, так как он замерзает при более низкой температуре, чем вода. Вода без кристаллизации переходит в стекловидное состояние, ткани механически не разрушаются, глицерин разбавляет незамерзшие насыщенные растворы соли. Клетки выдерживали температуру 77 К, но при размораживании восстанавливалась жизнедеятельность. Вскоре, однако, выяснилось, что размороженный костный мозг трудно отделить от глицерина, а пересаживать человеку кроветворную ткань вместе с глицерином нельзя.

Тогда украинские ученые применили другую защитную среду — низкомолекулярный поливинилпирролидон. Это синтетическое вещество надежно защищает клетки костного мозга при замораживании. Консервированную кроветворную ткань перед пересадкой не нужно очищать от поливинилпирролидона, так как он совершенно безвреден для организма.

Опыты показали, что замороженный костный мозг можно перевозить на любое расстояние всеми видами транспорта.

Ныне, когда трудами медиков и специалистов по криогенной технике решены основные проблемы замораживания и хранения при температуре 77 К костного мозга, во многих городах страны создаются соответствующие «банки» для его хранения. У доноров или скоропостижно умерших людей (в первые часы после смерти) извлекают костный мозг. После обработки защитной средой в стеклянных ампулах или в металлических контейнерах его замораживают в два этапа в специальном комплексе низкотемпературного оборудования. Процесс идет по программе дозированного расхода жидкого азота. Так, на первом этапе температура снижается со скоростью 1 град/мин, на втором — 10 град/мин. Возможно и ультрабыстрое замораживание, со скоростью до 4 град/с. Выбранный режим поддерживается автоматически.

Хранят костный мозг (или другие биопродукты) в контейнерах, которые устанавливают на стеллажах в бункере с жидким азотом. За сутки потери жидкого азота от испарения не превышают 2,4%. В настоящее время нормативный срок хранения костного мозга — три года, что гарантирует сохранность 80—85% клеток.

В некоторых случаях перед сеансами лучевой терапии или другим курсом лечения у больных извлекают

костный мозг и замораживают его по описанной методике. Радиоизотопное лечение или лекарства могут угнетающе влиять на кроветворную ткань больных. По окончании курса лечения для устранения нежелательных последствий больному вводится собственный костный мозг. После пересадки кроветворной ткани у всех пациентов улучшилось общее состояние. Таким образом, открылась перспектива более интенсивного применения радиоизотопного облучения и химиотерапии.

В длительном космическом рейсе люди могут пострадать от выброса частиц высоких энергий. Возможно, что вскоре на звездолетах будут хранить запас замороженного костного мозга космонавтов. При облучении людям будет пересажена собственная кроветворная ткань.

Подобным же образом создаются «банки» эритроцитов, кожи, костей, кровеносных сосудов, фасций, нервов и других тканей.

...Из Ленинграда в Москву вне рейса вылетает самолет. На аэродроме уже дежурит санитарный автомобиль, в Институте трансплантации органов и тканей срочно разворачивается операционная. На борту сверхзвукового лайнера драгоценный груз — почка, взятая у человека, недавно погибшего в автомобильной катастрофе. Только ее пересадка может спасти жизнь безнадежно больного.

...На улицах Лондона полицейские перекрывают движение. В одну из больниц мчится машина, в которой везут трансплантируемый орган.

Хотя пересаживаемые органы погружают в консервирующие растворы, их жизнедеятельность ограничивается всего несколькими часами. К сожалению, до сих пор не удалось решить проблему длительного хранения сердца, печени, почек, селезенки, легких, эндокринных желез. А механизм воздействия криогенных температур на отдельные органы и живые организмы во многом еще неясен. Например, известно, что предварительно закаленные споры и семена в высушенном состоянии, гусеницы отдельных бабочек, такие микробы, как дефтеритная палочка и холерный вибрион, мхи, лишайники удалось оживить после длительного замораживания при криогенных температурах. В большинстве же случаев при воздействии криогенной температуры на клетку в ней происходят необратимые изменения. Из-за потери воды, нарушения солевого равновесия, увеличения кон-

центрации электролитов, появления кристаллов льда и по другим причинам клетка погибает. Если же погрузить в жидкий азот крупное животное, то даже при большой скорости замораживания охлаждение центральных органов будет происходить недостаточно быстро. Лед начнет разрывать ткани, в замерзающей воде недопустимо повысится концентрация солей.

В 1947 г. в докладах ВАСХНИЛ появилась статья И. И. Соколовской «Может ли замороженная сперма оплодотворять и давать потомство»? Такая постановка проблемы многим ученым тогда казалась фантастической, хотя сообщалось, что впервые в мире от замороженного семени удалось получить 66 крольчат.

Выдающийся ученый-биолог профессор И. И. Иванов первым пришел к выводу, что «искусственное осеменение млекопитающих не только возможно, но и должно явиться одним из могучих двигателей прогресса». Ныне работы ученого признаны как одно из самых замечательных научных открытий в биологии. Советский Союз занимает первое место в мире по численности искусственно осемененных животных. Сейчас из каждого трех крупных сельскохозяйственных животных двое появляются на свет благодаря этому методу. Потомство от каждого высокоценного племенного производителя увеличивается в 25—30 раз, выход молодняка возрастает с 65—70 до 90—95 %.

Сравнительно недавно в испытательный рейс по маршруту Москва—Ростов-на-Дону отправился авторефрижератор новой конструкции со скоропортящимися пищевыми продуктами в кузове. У опытной машины вместо обычной холодильной установки были установлены емкости с жидким газом и система автоматического поддержания температуры. Жидкий азот поступал через электромагнитный клапан в распылитель, испаряясь, он отнимал излишки тепла в кузове. Шофер мог поддерживать любую температуру в авторефрижераторе — от 253 до 285 К.

При использовании в качестве хладагента жидкого азота сохранились все питательные свойства продуктов, вкус, внешний вид, уменьшилась на несколько процентов их усушка. Конструкция авторефрижератора заметно упростилась.

Предполагается в ближайшие годы наладить серийный выпуск новых авторефрижераторов и рефрижера-

торных железнодорожных вагонов, построить сеть станций для их заправки жидким азотом. Авторефрижераторы с азотным охлаждением в первую очередь будут использованы в южных городах страны.

Подобные машины имеются в США, Англии, ФРГ. Разрабатываются и стационарные холодильные установки (для замораживания и хранения пищевых продуктов), в которых применен жидкий азот.

\*  
\*   \*   \*

Криогеника — наука очень молодая, но за последние 10—15 лет она стала ведущей отраслью, в значительной мере определяющей научно-технический прогресс. Ее развитие в грядущие годы означает дальнейшее расширение возможностей человека.

## Литература

Бункель В. Сверхпроводимость. М., «Мир», 1975.

Веников В. А. и др. Сверхпроводники в энергетике. М., «Энергия», 1972.

Екимов В. Д. Низкие температуры в радиоэлектронике. М., «Знание», 1972.

Джолли У. Криоэлектроника. М., «Мир», 1975.

Криохирurgia. Под ред. Э. И. Канделя. М., «Медицина», 1974.

Малков М. П., Данилов И. Б. Криогеника. М., «Знание», 1970.

Микулин Е. И. Криогенная техника. М., «Машиностроение», 1969.

Уильямс Дж. Сверхпроводимость и ее применение в технике. М., «Мир», 1973.

Фастовский В. Г. и др. Криогенная техника. М., «Энергия», 1975.

## СОДЕРЖАНИЕ

Сверхпроводимость и электротехника . . . . .	3
Транспорт и космические исследования . . . . .	25
Научные исследования, приборы, электроника . . . . .	30
Водород — универсальное топливо? . . . . .	44
Системы глубокого охлаждения в медицине и биологии . . . . .	53
Литература . . . . .	61

**Патрунов Феликс Георгиевич**

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Редактор Г. И. Флиорент

Обложка В. Б. Лукина

Худож. редактор Т. И. Добровольнова

Техн. редактор Т. В. Пичугина

Корректор В. Е. Калинина

А 08479. Индекс заказа 55008. Сдано в набор 10/VI 1975 г. Подписано к печати 9/VI 1975 г. Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 1. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл.-печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,29. Тираж 67 640 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 1209. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Цена 11 коп.

## Уважаемый товарищ!

Издательство «Знание» выпускает серию научно-популярных брошюр **«Промышленность»**, освещающих направления технической и экономической политики КПСС в промышленности, а также практический опыт отраслей промышленности и отдельных предприятий в деле выполнения пятилетних планов народного хозяйства.

Брошюры серии рассчитаны на руководителей предприятий, инженерно-технических работников, экономистов. Они также будут полезны широкому кругу партийно-хозяйственного актива, пропагандистам, лекторам и другим читателям, интересующимся вопросами совершенствования отечественной промышленности.

Всего в этой серии выпускается 12 номеров в год, по одной брошюре в месяц. Причем брошюры Вы сможете получать прямо на дом, подписавшись в любом отделении связи или у общественного распространителя печати по месту Вашей работы или учебы. Это будет удобнее для Вас, тем более что не все брошюры серии поступают в розничную продажу.

В каталоге «Союзпечати» Вы найдете эту серию в разделе «Научно-популярные журналы» под рубрикой «Брошюры издательства «Знание». Индекс серии в каталоге «Союзпечати» — 70097. Подписная цена на год — 1 руб. 32 коп., на полугодие — 66 коп., на квартал — 33 коп.

В 1975 году до конца года подписчики серии «Промышленность» получают, в частности, следующие брошюры:

**О. И. Волков**, д-р экон. наук. **Совершенствование управления экономикой.**

**О. А. Перелешина**, канд. экон. наук. **Новые задачи Старопромышленного района (о комплексном развитии промышленности Урала).**

**Е. А. Шапиро**, канд. экон. наук. **Экономическая эффективность рационального использования природных ресурсов в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.**

**А. С. Паламарчук**, канд. экон. наук. **Плани-**

**рование и экономическое стимулирование в научно-производственных объединениях.**

В 1976 году запланирован выпуск следующих брошюр:

**С. П. Первушин, д-р экон. наук. Материалоемкость промышленного производства.**

**В. В. Битунов, канд. экон. наук. Новая техника и планирование производительности труда.**

**Ю. М. Петров, канд. экон. наук. Прогнозирование и долгосрочное планирование производства.**

**В. Э. Жданович, канд. экон. наук. Тимано-Печорский народнохозяйственный комплекс.**

**П. А. Морозов, доцент. Фактор времени на социалистическом предприятии**  
и ряд других брошюр.

