

ТЕХНИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1986/7

КРИОГЕНИКА

Немного истории

*Мозаика
для лектора*

В.Ворошилов
ЭТИ РАБОЧИЕ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ
ТЕМПЕРАТУРЫ...

*Микроэлектроника
и холод*



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ТЕХНИКА

№ 7

Издается
ежемесячно
с 1961 г.

КРИОГЕНИКА

В ЭТОМ НОМЕРЕ

В. Ворошилов,

кандидат технических наук

ЭТИ РАБОЧИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ...

НЕМНОГО ИСТОРИИ

МОЗАИКА ДЛЯ ЛЕКТОРА

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ХОЛОД

КРИОГЕННАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Издательство «Знание» Москва 1986

РЕДКОПЛЕГИЯ

К. В. Фролов,
академик
(председатель)

А. И. Аристов,
кандидат технических наук

Б. М. Базров,
доктор технических наук, профессор

Г. В. Веников,
кандидат технических наук

Л. И. Волчкевич,
доктор технических наук, профессор

Ю. Т. Гринь,
доктор физико-математических наук

В. А. Данилычев,
доктор физико-математических наук, профессор

В. Я. Зайцев,
доктор технических наук, профессор

Е. П. Попов,
член-корреспондент АН СССР

Р. А. Чаянов,
начальник отдела ГКНТ

К. Ю. Чириков,
кандидат технических наук

К ЧИТАТЕЛЮ

Состояние, в котором находится вещество, зависит в первую очередь от его температуры. Эта температура определяется интенсивностью беспорядочного, так называемого теплового, движения молекул и атомов вещества. Чем интенсивнее движутся молекулы и атомы внутри тела, тем выше его температура. По мере его охлаждения движение постепенно затухает и при $-273,15^{\circ}\text{C}$ совершенно прекращается, запас тепловой энергии полностью исчерпан, и дальнейшее понижение температуры, очевидно, уже невозможно.

С определенной долей условности при использовании низких температур можно выделить четыре области: умеренно низких — от 300 до 200К (кондиционирование воздуха, хранение пищевых продуктов и т. п.); глубокого холода — от 200 до 70К (разделение воздуха и промышленных газов, ожижение метана, кислорода, азота); криогенных температур — от 70 до 0,3К (ожижение водорода и гелия и процессы охлаждения этими жидкостями); сверхнизких температур — ниже 0,3К.

Международный институт холода (СССР является членом этой организации) предложил считать датой рождения криогеники октябрь 1877 г., когда два ученых — француз Л. Кайе и швейцарец Р. Пикте — независимо друг от друга получили сохранявшиеся в течение нескольких секунд температуры около 90К. Почти половину своей без малого 110-летней истории криогеника практически не выходила за стены специальных лабораторий. (Хотя, и это следует отметить, первые довольно робкие попытки применить криогенные температуры в промышленности имели место в 20-х годах нашего столетия.) В 40-х годах XX в. положение начало быстро меняться, и сегодня использование достижений криогеники — одно из важных направлений научно-технического прогресса. Биология и радиоэлектроника, ракетная техника и медицина, авиация и сельское хозяйство, металлургия и космонавтика, энергетика и химия, ряд отраслей физических наук, в том числе ядерная физика, используют криогенное оборудование, криогенные продукты в постоянно растущих масштабах. Формиру-

ются целые новые направления научно-технических исследований — такие, как криофизика, криобиология, криоэлектроника, криоэнергетика.

Мир криогенных температур необычен; в его условиях ученые встретились с новыми физическими явлениями, изучение которых позволяет глубже проникнуть в тайны строения материи. Криогеника дала исследователям возможность использовать принципиально новые методы. На основе криогенной техники начали осуществляться совершенно новые, оригинальные и очень продуктивные технологические процессы. Необходимо отметить, что в ряде случаев применение криогенной техники является сейчас единственным путем осуществления некоторых технологических процессов (сверхпроводимость в электронике, например).

Достижения в области криогенной техники, темпы роста производства криогенного оборудования и криогенных продуктов с достаточным основанием считаются сегодня одним из важных показателей научно-технического и промышленно-экономического уровня той или иной страны. В Советском Союзе, как и в ряде других наиболее промышленно развитых стран, сформировалась самостоятельная отрасль машиностроения — криогенное машиностроение. От первых отечественных воздухоразделительных установок, созданных в начале 30-х годов для интенсификации мартеновского и доменного производства, до криоустановок для ректификации жидкого водорода, позволивших получать в больших количествах дейтерий, столь необходимый в перспективе ядерной энергетике, — таков путь советской криогенной техники за минувшие пять десятилетий. Путь, отмеченный поистине замечательными открытиями и свершениями, заложивший мощную основу поступательного развития к технике будущего.

К. Ю. ЧИРИКОВ,
кандидат технических наук

В. Ворошилов

ЭТИ РАБОЧИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ...

Сначала — три определения, без которых дальнейшее изложение может быть непонятным читателю, незнакомому с темой «Криогеника».

Итак, определение первое: **криогеника** — это область науки, включающая исследование, развитие и применение криогенной техники.

Второе определение: согласно ГОСТ 21957—76 **криогенная техника** — это область техники, связанная с получением и практическим использованием криогенных температур.

Наконец, третье определение: в переводе с греческого слово «криогенный» означает «производящий холод»; данный термин служит для обозначения процессов и технических устройств, позволяющих получать температуры ниже 120К.

...Подмосковный город Балашиху сведущие люди нередко называют столицей советской криогенной техники. Здесь расположено научно-производственное объединение «Криогенмаш» им. 40-летия Октября, выпускающее до 60% всего криогенного оборудования, производимого в стране. При этом надо отметить, что Советский Союз не покупает зарубежной криогенной техники.

Коллектив НПО «Криогенмаш», возглавляемый членом-корреспондентом АН СССР В. П. Беляковым, добился прекрасных результатов. Вот некоторые убедительные цифры и факты. В каждом изделии НПО «Криогенмаш» использовано от 5 до 20 изобретений советских специалистов. Все производимое «Криогенмашем» оборудование обладает патентной чистотой, лицензии на некоторые его виды приобретены такими высокоразвитыми капиталистическими странами, как США и ФРГ; ежегодно 70% продукции объединения составляет новая техника. В новых разработках используется в среднем 80% типовых и унифицированных деталей и сборочных единиц (в количественном исчислении их

свыше 120 000). Даже при разработке уникальных технических устройств, выпускаемых в единичных экземплярах, конструкторам «Криогенмаша» требуется лишь 20% новых чертежей.

Элегантный пингвин — фирменный знак НПО «Криогенмаш» — хорошо известен в нашей стране и за рубежом. Он означает, что заказчик получил производительное, экономичное, удобное в эксплуатации оборудование, отвечающее самым строгим современным требованиям и соответствующее самым высоким мировым стандартам.

МАШИНЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР И КРИОПРОДУКТОВ. Воздухоразделительные установки (ВРУ) сегодня являются основным оборудованием для получения газообразных и жидких кислорода, азота, аргона, а также ксеноно-криптоновой и неона-гелиевой смесей при криогенных температурах. Установки производительностью более 6000 м³/ч перерабатываемого воздуха работают по технологической схеме, основа которой — холодильный цикл низкого давления с турбодетандером. Схема разработана академиком П. Л. Капицей в 30—40-х годах. Воздух, сжатый в турбокомпрессоре (до давления 0,6 МПа), поступает в регенераторы. Здесь большая его часть охлаждается до температуры насыщения и освобождается от водяных паров и двуокиси углерода. Меньшая отбирается из регенераторов и подается в адсорберы, в которых из воздуха удаляется двуокись углерода; после этого поток воздуха поступает в турбодетандер. Это так называемый детандерный поток; чтобы количество воздуха в нем соответствовало требуемому его расходу в турбодетандере, какое-то количество его отбирается (или добавляется).

Количество воздуха, подаваемого в турбодетандер, ограничено условиями ректификации. В то же время именно от количества подаваемого в турбодетандер воздуха зависит холодопроизводительность установки. Вот почему описываемая схема — схема низкого давления — применяется в установках большой производительности, в которых незначительны удельные холодопотери. И хотя ВРУ низкого давления в принципе могут быть использованы для производства и жидкого продукта (до 10% производительности по газообразному продукту), они предназначены прежде всего для получения газооб-

разных продуктов разделения воздуха. Вообще же ВРУ большой производительности позволяют одновременно получать от трех до семи видов продуктов разделения воздуха — в различных агрегатных состояниях и различной чистоты.

Вот два примера. ВРУ КТ-70 (год выпуска первого образца — 1978), перерабатывающая 350 000 м³/ч воздуха, производит: технологического кислорода — 66 000 м³/ч; жидкого кислорода (чистота 99,7% O₂) — 5050 кг/ч; чистого азота (чистота 99% N₂) — 30 000 м³/ч; жидкого азота (чистота 99,9995% N₂) — 50 кг/ч; криптоно-ксенонового концентрата (чистота 100% K₂+He) — 0,26 м³/ч; неона-гелиевой смеси (чистота 100% Ne+He) — 3,82 м³/ч. ВРУ А-6 (год выпуска первого образца — 1980) перерабатывает 15 600 м³/ч воздуха и производит: технического кислорода — 100 м³/ч; чистого азота — 5500 м³/ч; жидкого азота (чистота — 99,9995% N₂) — 110 кг/ч.

Принципиальная схема ВРУ низкого давления включает в себя большое количество узлов и аппаратов. Так, ВРУ КТ-70 состоит из: воздушного скруббера, азотно-го скруббера, регенераторов, отмывочной колонки, адсорберов кубовой жидкости, циркуляционного насоса, верхней и нижней колонн, переохладителя-подогревателя, турбодетандеров, конденсаторов, криптоновой колонны с конденсатором, адсорберов жидкого кислорода, колонны технического кислорода с конденсатором. Перечисление достаточно убедительно свидетельствует о сложности принципиальной схемы применяемых в современной промышленности ВРУ низкого давления.

Все эти узлы группируются (в известной мере условно) в две основные части схемы — охлаждения и ректификации. В системе охлаждения (теплообменные аппараты, детандеры, насосы сжиженных газов) воздух охлаждается выходящими продуктами разделения; одновременно он очищается от примесей и осушается; в системе ректификации (ректификационные колонны, конденсаторы, переохладители) воздух разделяется на составляющие его части.

Остановимся несколько подробнее на турбодетандере — источнике холода в ВРУ низкого давления. Именно от эффективности турбодетандера как источника холода прежде всего зависит экономичность всей ВРУ. Однако здесь необходимо различать эффективность са-

мого турбодетандера и эффективность его использования в ВРУ — это, как показывает практика, отнюдь не одно и то же. Эффективность турбодетандера принято оценивать изэнтропийным КПД, соответствующим расчетному режиму работы и характеризующим газодинамическое совершенство устройства. Но дело в том, что в нерасчетных (иными словами, неблагоприятных) условиях изэнтропийный КПД детандера может оказаться значительно ниже номинального показателя.

В современных ВРУ низкого давления холодопроизводительность турбодетандера регулируется поворотом лопаток направляющего аппарата, что позволяет изменять площадь проходного сечения; имеет место постепенное непрерывное регулирование, причем без остановки машины. Достоинство такого регулирования — возможность автоматизации процесса.

Турбодетандеры, используемые в современных ВРУ низкого давления, представляют собой одноступенчатые центробежные реактивные турбины с регулирующим направляющим аппаратом. Это мощные машины с частотой вращения двигателя до 30 000 об/мин. Помимо собственно детандера, имеется ряд устройств, обеспечивающих нормальное функционирование всего агрегата, — системы торможения, смазки, защиты от чрезмерного увеличения скорости вращения, коммуникации, контрольно-измерительные приборы и т. д.

Систему охлаждения ВРУ низкого давления вместе с турбодетандерами составляют: турбокомпрессор, система азотно-водяного охлаждения, петлевые адсорберы, холодильная машина, реверсивные или нереверсивные пластинчато-ребристые теплообменники или адсорберы комплексной очистки воздуха.

Основным аппаратом узла ректификации ВРУ низкого давления служит ректификационная колонна: здесь воздух разделяется при криогенных температурах. В зависимости от того, какой газ является главным продуктом ВРУ, выбирается схема блоков разделения. Так, во ВРУ для получения технологического и технического кислорода и других продуктов разделения воздуха блок ректификации строится по схеме двойной ректификации: в нижней ректификационной колонне воздух разделяется на чистый азот и кубовую жидкость, в верхней колонне — на чистый газообразный азот и чистый жидкий кислород. Чистый газообразный азот выходит из верхней

части ректификационной колонны под давлением и после рекуперации холода в регенераторе поступает к потребителю. В свою очередь, ВРУ комплексного разделения воздуха, естественно, оснащены значительно более сложными узлами ректификации. Они имеют до шести ректификационных колонн: нижнюю, верхнюю, колонну сырого аргона, колонну технического кислорода, криптоновую колонну, колонну чистого аргона и азота.

Важная часть узла ректификации ВРУ — конденсаторы. В большинстве отечественных ВРУ используются трубчатые конденсаторы-испарители с трубчаткой из большого числа парогенерирующих трубок. Поступающая в них жидкость частично испаряется и отводится в верхнюю зону трубчатки. Здесь происходит сепарация двухфазной парожидкостной системы; газообразный продукт забирается из аппарата, а неиспарившаяся жидкость попадает в циркуляционный контур и направляется на повторное испарение. Второй тип используемых сейчас конденсаторов-испарителей, причем они находят все более широкое применение, — пластинчато-ребристые аппараты. Главные их преимущества — компактность и меньшая энергоемкость. Не останавливаясь на их конструкции, отметим, что в отечественных ВРУ используются пластинчато-ребристые конденсаторы вертикального и горизонтального типа; типовой ряд этих конденсаторов-испарителей, созданный отечественными конструкторами, позволяет комплектовать ВРУ низкого давления самой различной производительности — от 6000 до 350 000 м³/ч перерабатываемого воздуха.

По мнению многих специалистов, очень перспективны разработки в области создания трубчатых конденсаторов с капиллярно-пористым покрытием трубок со стороны поверхности кипения. Коэффициент теплоотдачи от стенки в кипящий сжиженный кислород в таких трубках в 4—6 раз выше, чем в трубках с гладкой поверхностью. А дополнительное «оребрение» поверхности трубок позволяет еще больше сократить их необходимое по технологическим параметрам количество и тем самым значительно уменьшить размеры конденсатора. Капиллярно-пористое покрытие можно наносить газотермическим напылением — методом простым, экономичным, недорогим и высокопроизводительным: полученный пористый слой очень прочен и стоек к воздействию термических и вибрационных нагрузок.

Как уже отмечалось, жидкие продукты разделения воздуха можно получать на комплексных ВРУ различных типов и даже — в небольших количествах — на ВРУ, производящих газообразный технологический кислород. Однако большая часть жидких продуктов разделения воздуха производится с помощью специализированных ВРУ. Здесь следует отметить, что в ВРУ низкого давления для получения газообразных продуктов львиная доля затрачиваемой энергии (85—90%) идет на обеспечение собственно процесса разделения воздуха и лишь незначительная часть — на покрытие холодопотерь. Иначе обстоит дело во ВРУ для получения жидких продуктов: в них не менее 65% расходуемой энергии идет на производство холода. Именно в связи с этим мощные ВРУ для получения жидких продуктов komponуются преимущественно по схемам с использованием циклов среднего давления.

В предвоенные годы огромным достижением в области криогенной техники была схема двух давлений — так называемая «компаунд», предложенная академиком П. Л. Капицей. Эта схема использовала поток воздуха среднего давления и азотный холодильный цикл низкого давления. Сейчас широко применяется схема двух давлений с потоком воздуха среднего давления и азотным холодильным циклом среднего давления, при которой общее количество перерабатываемого воздуха, при прочих равных условиях, много меньше, чем при схеме «компаунд». Существуют и другие схемы ВРУ среднего давления для получения жидких продуктов. Энергетические показатели всех этих схем в значительной мере зависят от числа ступеней охлаждения. Включение в схему нескольких турбодетандеров (на разных температурных уровнях), а также использование предварительного фреонового охлаждения способствуют снижению энергетических и иных затрат на единицу производимых продуктов разделения воздуха (хотя и усложняют установку). Как показывают расчеты, каждая последующая ступень охлаждения улучшает энергетические показатели ВРУ среднего давления на 6—10%.

В заключение отметим, что для получения сравнительно небольших количеств жидких продуктов разделения воздуха (до 2 т/ч) используются ВРУ высокого давления с предварительным фреоновым охлаждением.

Это очень эффективная схема с хорошими показателями энергоемкости процесса.

Криогенные газовые машины (КГМ). Такие машины широко используются в качестве источников получения криогенных температур, причем в самых различных отраслях техники, в том числе и в таких, как микрокриогенная, высоковакуумная и т. д. По общему мнению, у этих машин большое будущее, чем и объясняется внимание к ним ученых, работающих в различных отраслях физических и технических наук. Однако прежде чем кратко охарактеризовать основные типы КГМ, необходимо сказать буквально несколько слов об их истории.

В 1816 г. англичанин Р. Стирлинг изобрел двигатель внешнего сгорания, известный как «машина Стирлинга» или «двигатель Стирлинга». Принцип действия двигателя следующий. Рабочее тело — гелий (или водород) под давлением — находится в замкнутом пространстве и во время работы, при охлаждении и нагревании, меняет объем. Регенератор как бы разделяет это пространство на горячую (верхнюю) и холодную (нижнюю) полости. К верхней полости подводится тепло (от нагревателя), от нижней — тепло отводится охладителем. Не рассказывая подробно о том, как работает этот двигатель, скажем только, что как собственно двигатель машина Стирлинга почти не применяется. Зато специалисты уже довольно давно обратили внимание на то, что рабочее тело в нижней полости машины охлаждается.

В 1834 г. Дж. Гершель выявил возможность использования «двигателя Стирлинга» в качестве холодильных машин. В 1871 г. пражский ученый — профессор Г. Шмидт — опубликовал работу, в которой была сделана плодотворная попытка создать теорию машин со встроенными теплообменными аппаратами. Некоторое время такие машины достаточно успешно эксплуатировались в пищевой промышленности, но затем были вытеснены паровыми холодильными машинами.

Началом нового этапа истории машин, использующих принцип Стирлинга, принято считать 1954 г., когда специалисты из лабораторий голландской фирмы «Филипс» разработали и построили новый для того времени аппарат ожижения воздуха (производительность 46,4 кВт при температуре 77К). Реализации старой идеи, в частности, помогла разработка теплообменных аппаратов Дж. Келлером и К. Джонкерсом в начале 50-х годов.

(Без последних, как остроумно заметили авторы книги «Криогенные газовые машины» А. Суслов, Д. Гороховский и др., «машину Стирлинга можно было бы использовать только в механических игрушках».) Именно Келлер и Джонкерс открыли машине Стирлинга путь в криогенную технику.

Машина фирмы «Филипс» стала технической сенсацией, привлечшей внимание к, казалось бы, забытому типу машин со встроенными теплообменными аппаратами. Крупные и средние КГМ, применяемые в воздухо-разделительных установках, пока не получили достаточно широкого распространения. Это объясняется прежде всего успехами в совершенствовании машин и аппаратов, традиционно используемых в криогенных установках. Более широко распространены КГМ в микрокриогенной технике. При небольшой холодопроизводительности эти машины выигрывают соревнование с другими устройствами благодаря сравнительно малой массе, небольшим размерам, коротким пусковым периодам. Важные усовершенствования машин данной группы в последний период сделаны именно специалистами в области микрокриогенных устройств.

В 1959 г. В. Гиффордом были созданы первые образцы оригинальных микроохладителей, которые сейчас применяются для получения криогенных температур вплоть до 4,3К. И хотя действующие образцы таких КГМ пока не рассчитаны на большую производительность, многие специалисты считают, что дело здесь за усовершенствованием этих машин с целью повышения их КПД и производительности. Подтверждением этого мнения является, в частности, разработанный в МВТУ им. Н. Э. Баумана цикл с процессами расширения и обратного сжатия, повысивший КПД машин в 1,3—1,8 раза.

Криогенная газовая машина имеет одну или две полости с изменяющимися объемами и теплообменные аппараты. И основные особенности той или иной КГМ определяются характеристиками составляющих ее узлов, которые можно подразделить на три типа — поршневой, вытеснительный и комбинированный. Рассмотрим их в порядке перечисления.

Схематично поршневой узел состоит из движущегося в цилиндре поршня, аппарата внешнего теплообмена и регенератора. Если процесс в поршневом узле идет по

часовой стрелке, он работает как детандер (при подводе к газу теплоты в аппарате внешнего теплообмена от холодного источника с температурой ниже температуры окружающей среды) или как тепловой двигатель (при подводе к газу теплоты от источника с температурой выше температуры окружающей среды). Если же поршневой двигатель работает против часовой стрелки, то в нем реализуется обратный процесс — к поршню от вала машины передается движение, а от аппарата внешнего теплообмена отводится теплота — его следует считать компрессором.

Вытеснительный узел (схематично) состоит из вытеснителя, цилиндра, регенератора и двух аппаратов внешнего теплообмена. Цилиндр делится вытеснителем на два объема, связанных между собой через теплообменные аппараты; к каждому объему примыкает соответствующая часть регенератора. Иными словами, вытеснительный узел состоит из двух поршневых узлов. И если в одном из них совершается цикл двигателя (детандера), во втором происходит цикл компрессора. Вытеснитель не может быть использован для подвода или отвода механической энергии (последняя подводится к вытеснителю только для преодоления сил гидравлического сопротивления и трения).

Наконец, еще один тип узла — комбинированный. В нем основная деталь служит и поршнем и вытеснителем. В результате часть работы расширения в левой полости используется для сжатия газа в правой полости, а остальная отводится на вал машины. Благодаря такой конструктивной особенности КГМ с комбинированным рабочим узлом может использоваться и как охладитель, и как компрессор, и как двигатель, и как тепловой насос.

Как уже говорилось, специфическая особенность КГМ — наличие в машине встроенных теплообменных аппаратов, а также регенератора. Именно это во многом объясняет сложность протекающих в КГМ процессов: изменение того или иного параметра или конструктивной особенности различных элементов КГМ влияет не только на процессы в этом элементе, но и на весь рабочий процесс в целом и заметно сказывается на холодопроизводительности и эффективности всей машины.

Остановимся на конструкции аппаратов внешнего теплообмена, т. е. аппаратов, обеспечивающих связь ма-

шины с внешними источниками теплоты. Это холодильники, теплообменники нагрузки и нагреватели. В холодильниках теплота отводится от циркулирующего в КГМ рабочего тела в окружающую среду. Теплообменники нагрузки и нагреватели отводят теплоту в цикл. При этом теплота отводится от источников теплоты высокого потенциала и от охлаждаемого объекта, имеющего низкую температуру.

В КГМ большой холодопроизводительности используются холодильники в виде трубчатого аппарата. При тепловой нагрузке не более 1 кВт широко используются сравнительно просто изготавливаемые щелевые теплообменники с развитой поверхностью теплообмена при большой компактности, удобные для соединения с другими узлами машины. Основная деталь такого холодильника — толстостенная втулка из материала с высокой теплопроводностью. Теплообменная поверхность холодильника со стороны рабочего газа определяется числом пазов, нарезанных на внутренней поверхности втулки. (Отметим попутно, что пазы малой ширины получают электроэрозионным способом, а более широкие, фрезеруют.)

В последнее время в технике растет интерес к использованию в КГМ в качестве источника энергии теплового потока высокого потенциала (прежде всего это газовые нагреватели, а также радиоактивные изотопы, солнечные концентраторы и т. д.). Газовые нагреватели наиболее распространенных типов — щелевые и трубчатые. У первых обычно ребристая наружная поверхность; высота ребер ограничивается, чтобы избежать местных перегревов конструкции. Трубчатые газовые нагреватели — это пучок изогнутых трубок, которые связывают регенератор с крышкой цилиндра. Главное преимущество таких нагревателей в том, что теплота от продуктов сгорания непосредственно, через тонкие стенки трубок, передается рабочему газу. Следует отметить, что нагреватели изготавливают из ограниченного набора конструкционных материалов, способных длительное время работать при температуре около 1000°С. Кроме того, конструирование высокотемпературной зоны теплоиспользующих КГМ связано с расчетом и точным выбором эффективной теплоизоляции. Последняя, помимо обычных требований к теплоизоляции (хорошие собственно теплоизоляционные показатели, термостойкость, огне-

упорность и т. д.), не должна «вносить» в вакуумное пространство загрязняющих примесей, взаимодействовать с нагревательным элементом, а кроме того, легко дегазироваться.

Коротко скажем о регенераторах КГМ. В настоящее время используют три варианта размещения регенераторов в криогенных газовых машинах — выносной, кольцевой и внутри вытеснителя КГМ. Преимущества выносного регенератора в простоте изготовления, а также в том, что, поскольку и аппараты внешнего теплообмена в этом случае могут быть выносными, их высокой эффективности добиваются, развивая поверхность теплообмена. Кольцевое размещение регенератора вокруг цилиндра КГМ конструктивно более сложно, но зато позволяет значительно уменьшить размеры низкотемпературной части машины. Ряд преимуществ имеет и вариант размещения регенератора внутри вытеснителя КГМ. В частности, в микрокриогенной технике это конструктивное решение холодопроизводящей машины позволило существенно уменьшить поперечные размеры низкотемпературной части КГМ.

Регенераторы чрезвычайно чувствительны к чистоте рабочего газа. Затвердевающие примеси и продукты газовой выделений резко увеличивают показатели гидравлического сопротивления регенератора, а это, в свою очередь, сказывается заметным снижением холодопроизводительности КГМ. Используемый в ВРУ метод самоочистки регенератора пригоден лишь в некоторых КГМ.

Потери в регенераторе — основная причина возможного снижения эффективности КГМ. В зависимости от размеров и типа машины, от уровня термостатирования и других причин они могут составлять от 30 до 90%. Весьма важны конструкции насадок. В первой КГМ фирмы «Филипс» была применена проволочная насадка в виде так называемой «путанки». Позднее была разработана насадка из проволочных сеток (наиболее распространенная в настоящее время). Благодаря более равномерному распределению металла в объеме аппарата она эффективна; кроме того, что не менее важно, такая конструкция насадки значительно ускорила процесс изготовления регенератора.

Наиболее удачной насадкой большинство специалистов считают оцинкованную сетку. Стандартную латунную или бронзовую сетку предварительно протравли-

вают, а затем электролитически покрывают тонким слоем свинца. Советские специалисты предложили добавлять к наносимому на сетку свинцу от 3 до 10% олова, что улучшает механические характеристики покрытия.

Еще один распространенный сейчас вид насадки — засыпаемые в корпус регенератора сферические элементы или, попросту говоря, шарики свинцовые, стальные, угольные с заполнением гелием, а также шарики из неодима, сульфата европия, теллурида европия и т. п.

Сейчас в различных отраслях техники используются КГМ четырех основных групп, в каждой из которых различают несколько типов. Это прежде всего группа КГМ с независимым компрессорным узлом, объединяющая три типа — с поршневым узлом, с вытеснительным узлом и с комбинированным узлом (в нем и поршень и вытеснитель). Общее преимущество этой группы КГМ в удобстве стыковки с охлаждающим устройством: непосредственно с ним связан только малогабаритный охлаждающий узел, а крупногабаритный компрессор располагается на расстоянии и не мешает работе охлаждающего устройства.

Вторая группа КГМ может быть названа «машинами, работающими по циклу Стирлинга». Криогенная машина одного из типов этой группы — с одним цилиндром — сейчас наиболее распространена благодаря компактности и высокому КПД. Многоцилиндровые машины этой группы используются менее широко, но данное направление считается весьма перспективным в разработке аппаратов высокой холодопроизводительности.

Схема машин третьей группы эквивалентна энергетической системе из теплового двигателя, преобразователя энергии и собственно криогенной машины. С одной стороны, КПД системы в принципе всегда меньше КПД отдельной входящей в нее машины. Однако поскольку в данном случае в КГМ этой группы нет нужды в промежуточных преобразованиях энергии и как следствие нет неизбежных при таких преобразованиях потерь, их КПД высок.

Наконец, КГМ четвертой группы. Здесь для сжатия газа используют только часть работы, производимой в горячей полости машины; остальная отводится на вал поршнем-вытеснителем. Это, естественно, снижает производительность компрессорного узла и общую эффек-

тивность машины. Однако в ряде случаев использовать эти машины необходимо. Дело в том, что работы расширения в полости охладителя может быть недостаточно для преодоления сил трения в механизме движения и гидравлических сопротивлений в аппарате. Тогда-то и используют КГМ данного типа; для полной компенсации упомянутых потерь служит часть работы газа горячей полости, отводимая на вал.

Ряд специалистов относят к КГМ, кроме вышеперечисленных, машины других видов, например пульсационные, в которых основной холодопроизводящий процесс — перенос теплоты при пульсации газа. Перспективны охладители с газовым вытеснителем и поршнями; с ними, в частности, связывают решение проблемы создания криогенных газовых машин, способных безостановочно функционировать в течение длительного времени. Серьезные работы в этой области ведутся специалистами МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Важная проблема — оптимизация термодинамических и конструктивных параметров КГМ. Не останавливаясь подробно на этом вопросе, подчеркнем только, что проблема эта весьма сложна: авторы многих публикаций по данной теме указывают, что число переменных, которые при этом необходимо учесть, может быть до 80! Понятно, что особая необходимость оптимизации многих параметров возникает при разработке машин новых видов или использовании узлов новых конструкций, т. е. тогда, когда предшествующий опыт недостаточен для обоснованного сокращения числа переменных, которые необходимо учесть. Однако достижения советских и зарубежных специалистов, работающих в области криогенной техники, дают достаточное основание для оптимистической оценки перспектив дальнейшего развития криогенных газовых машин как одного из важнейших элементов криогенной техники.

СИСТЕМЫ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ. В нашей стране, как и в ряде других промышленно развитых государств, в последние годы уделяется большое внимание разработке так называемых СПЛЭП — сверхпроводящих линий электропередачи — переменного и постоянного тока, гибкой и жесткой конструкции. В ближайшей перспективе наиболее реальными для практического применения представляются СПЛЭП небольшой протяженности.

К ним относят линии до 5 км, в основном постоянного тока, причем использующие большие токи при низких напряжениях. Ведутся теоретические разработки СПЛЭП относительно небольшой протяженности (до 50 км); их главное назначение, по мнению специалистов, — ввод электроэнергии в промышленные районы и города. В более отдаленной перспективе энергетики видят использование и СПЛЭП большой протяженности (в тысячи километров) — для передачи больших количеств энергии.

Всесторонние технико-экономические исследования эффективности СПЛЭП показали, что, несмотря на значительные затраты при строительстве и эксплуатации, сверхпроводящие линии электропередачи дадут несомненную выгоду, исчисляемую в масштабах нашей страны сотнями и сотнями миллионов рублей. При этом СПЛЭП имеют такие преимущества, как: возможность передачи энергии больших мощностей при сравнительно небольших напряжениях; возможность строить подземные трассы сверхпроводящих кабелей, что сберегает для народнохозяйственного использования обширные площади (это особенно важно в городах) и т. д.

Для отработки оптимальных конструкций СПЛЭП и систем их криогенного обеспечения созданы и эксплуатируются в опытном режиме участки сверхпроводящего кабеля. Рассмотрим две конструкции: участок жесткого сверхпроводящего кабеля длиной 100 м (СПК-100) и участок гибкого сверхпроводящего кабеля длиной 50 м (ГСПК-50). Вот какие данные о них приводит в своей книге «Криогенная техника и технология» член-корреспондент АН СССР В. П. Беляков.

Сверхпроводящий кабель СПК-100 рассчитан на номинальные токи 10 кА и напряжение 10,6 кВ. Он состоит из 8 магистральных секций по 12 м длиной каждая, одной поворотной секции и 2 токовводов. Кабель представляет собой двухфазный коаксиал с 2 сверхпроводящими жилами — расположенными одна внутри другой медными трубами диаметрами соответственно 110 и 80 мм, на которые нанесен слой сверхпроводящего материала (Nb, Sn). В зазоре между трубами течет криогенный материал — сверхкритический гелий с температурой 10–12К, который одновременно с охлаждением выполняет также функции электроизолятора. От внешнего теплового воздействия сверхпроводящий кабель за-

щищен несущей трубой из нержавеющей металла и теплоизоляцией из металлизированной пленки. Кроме того, в конструкции предусмотрены экранно-вакуумная изоляция и азотный экран (он охлаждается жидким азотом). Эти защитные элементы заключены в кожух из углеродистой стали, а из пространства между кожухом и несущей трубой откачивается воздух; давление здесь не превышает 10^{-3} Па.

При вводе СПК-10 в рабочий режим для охлаждения его до температур 10–12К гелий подается сразу через два токоввода, а отводится через поворотную муфту по середине участка СПК. При этом, естественно, из-за разницы в линейном расширении меди и стали возникает относительное перемещение токонесущих жил, с одной стороны, и несущей трубы — с другой. Для его компенсации в поворотной муфте предусмотрены зазоры. Компенсация изменения объема несущей трубы, азотного экрана и кожуха осуществляется за счет гибких элементов, усилия от сжатия которых передаются через так называемые «тепловые мосты» в вакуумной полости. После достижения рабочей температуры в рабочем режиме криоагент подается через весь кабель от одного токоввода к другому.

Конструктивно токоввод СПК-100 состоит из двух основных элементов — криостатирующей рубашки и токонесущей части. Криостатирующая рубашка для подвода гелия и азота выполнена из трех коаксиальных труб, образующих соответственно наружный кожух, азотный экран и внутреннюю гелиевую рубашку. Жидкий азот после охлаждения экрана токоввода идет в азотный экран сверхпроводящего кабеля (пройдя по всей длине участка, он затем выводится через второй токоввод). Сверхкритический гелий разделяется на два потока охлаждающий сверхпроводящие жилы и охлаждающий токонесущую часть токоввода. Сама токонесущая часть (ее функция — ввод электрического тока в сверхпроводящие жилы кабеля) представляет собой две коаксиальные медные трубы с нанесенным на их поверхность сверхпроводящим слоем. Ток подводится к ним через токонесущие шины, разделенные электроизолятором.

Опытный участок ГСПК-50 представляет собой следующее. Это две цилиндрические коаксиально расположенные, изолированные друг от друга сверхпроводящие жилы. Каждая жила — навитая по спирали на цилин-

дрический бандаж медная полоса с нанесенным на ее поверхность сверхпроводником. Кабель заключен в гибкую криостатирующую пятислойную оболочку: три нержавеющей гофрированные оболочки, наружная медная оболочка, служащая вакуумным кожухом, который, в свою очередь, покрыт еще одной пластмассовой оболочкой. В зазоре между второй и третьей гофрированной нержавеющей оболочкой протекает жидкий азот — это азотный теплоизолирующий экран. Криостатируется кабель проходящим в зазоре между жилами гелием с температурой 8—12К и под давлением (на входе) 1,0 МПа.

Система криогенного обеспечения с гелиевой и азотной частями у СПК-100 и ГСПК-50 одна и та же. Гелиевая криогенная система — одноконтурная, построена на базе двух серийных криогенных гелиевых установок КГУ-150/4,5. Она охлаждает токовводы и кабель до рабочих температур. Криостатирование СПК — при температурах от 5,3 до 15К. Для работы криогенной гелиевой системы с оптимальной эффективностью имеется обводной трубопровод (после детандера) и трубопровод возврата гелия из СПК в КГУ. По этим же трубопроводам подводится криоагент для захлаживания СПК до рабочих температур. Следует отметить использование в КГУ двигателей постоянного тока вместо асинхронных тормозных электродвигателей.

Для испытания СПК-100 и ГСПК-50 при повышенном токе в контуре циркуляции гелия в кабеле установлен эжектор, позволяющий увеличивать расход криоагента в 4—7 раз. А поскольку холодопроизводительность двух КГУ-150/4,5 в этом случае недостаточна, при режимах повышенных нагрузок тока дополнительно используется жидкий гелий из специального криогенного хранилища — резервуара РЦВГ-1,25/0,7 (емкостью 1,25 м³). Всего криогенная гелиевая система при повышенных по этому параметру нагрузках обеспечивает суммарную подачу в токовводы 7 г/с гелия и нейтрализацию тепловой нагрузки до 200 Вт.

Вторая (так сказать, подсобная) часть системы криогенного обслуживания — криогенная азотная система: два резервуара РЦВ-8/1,6 (емкостью 8 м³ жидкого азота под давлением 1,6 МПа), испарители жидкого азота (для поддува резервуара с целью сохранить давление при расходовании криоагента) и трубопроводы с запор-

но-регулирующей аппаратурой. Система обеспечивает подачу жидкого азота в КГУ, охлаждение и криостатирование адсорберов очистки гелия, охлаждение и криостатирование азотных экранов СПК, захлаживание до рабочих температур гелиевой системы, сверхпроводящего кабеля и токовводов.

При испытании СПК-100 и ГСПК-50 в используемой системе криогенного обеспечения сверхпроводимости проявились определенные недостатки (превышение расчетных значений тепловых потерь, повышенный теплоприток по криопроводам и некоторые другие). Конструкторы работают над их устранением. Однако имеющаяся в распоряжении экспериментаторов система полностью обеспечила режимы работы и ГСПК-50 и СПК-100.

Теперь поговорим о криогенном обеспечении МГД-генераторов. В систему криогенного обеспечения отечественных опытно-промышленных образцов МГД-генераторов мощностью 100 и 500 МВт входят гелиевый криостат для сверхпроводящего магнита, криогенная гелиевая установка (для производства жидкого гелия) и резервуар для хранения резервного запаса жидкого гелия, винтовые гелиевые компрессоры, азотная криогенная система для накопления и хранения жидкого азота с установкой обратной конденсации паров азота после охлаждения им различных объектов.

Гелиевый криостат, важнейшая часть системы, — горизонтальный теплоизоляционный сосуд достаточно большого диаметра и протяженности, чтобы внутри него мог разместиться сверхпроводящий магнит и канал МГД-генератора. (Отметим, что у МГД-генератора мощностью 100 МВт магнит имеет массу около 150 т.) Обмотка сверхпроводящего магнита навивается на силовую трубу, внутреннюю оболочку криостата. Для захлаживания обмотки магнита на силовой трубе сделаны продольные каналы, объединенные за пределами корпуса коллекторами, на которых установлены эжекторы для создания циркуляции криоагента. Шарнирные охлаждаемые опоры, на которых крепится силовая труба, выполняют две функции: компенсируют температурные деформации и препятствуют притоку теплоты. Одна стенка криостата съемная, что обеспечивает доступ электромагниту. На второй, неподвижной, монтируются коммуникации и токовводы.

Криостат делится на две зоны или камеры — рабочую (здесь находится магнит) и вспомогательную. В рабочей камере холодный сосуд дополнительно помещен в так называемую ложную обечайку с переливными трубами и газовой подушкой. Этим гарантируется эффективная эвакуация жидкого криоагента из зоны контакта с обмоткой сверхпроводящего магнита при аварийных тепловыделениях. Во вспомогательной камере находится змеевиковый теплообменник, выполняющий функции концевой системы гелиевого ожижителя; он отделен от рабочей камеры криостата переливной перегородкой, что гарантирует стабилизацию уровня жидкого криоагента над поверхностью магнита.

Оборудование ожижителя в соответствии с назначением группируется в блоки: маслоочистки и осушки, предварительного охлаждения, низкотемпературной очистки, теплообмена, турбодетандеров и ожижения. Технологический процесс ожижения гелия в этих блоках протекает следующим образом. Сжатый в компрессоре гелий при температуре около 270К очищается от масла и влаги, затем в азотной ванне блока предварительного охлаждения его температура снижается до 80К. Далее гелий проходит через блок низкотемпературной очистки, где освобождается от кислорода, водорода и других примесей. Теперь наступает очередь теплообменного блока: здесь около 60% гелия последовательно расширяется в двух турбодетандерах, остальные же 40% гелиевого потока при температуре около 15К уходят в блок ожижения. В этом блоке гелий расширяется в поршневом детандере и отводится в криостат, а отсюда — в рабочую камеру, где находится сверхпроводящий магнит МГД-генератора.

Токовводы, теплоизоляционные опоры и радиационные экраны выделяют тепло, и для компенсации их суммарных тепловыделений в системе криогенного обеспечения МГД-генератора предусмотрена специальная гелиевая установка. Для этого в отечественной практике применяется, в частности, установка ОГ-300, включающая ступень предварительного азотного охлаждения, две последовательные ступени расширения гелия в турбодетандерах и ступень с поршневым детандером.

В процессе охлаждения конструкции до заданной рабочей температуры (ниже 5К) нагревающийся криоагент возвращается в гелиевый ожижитель. Температу-

ра возвращаемого в ожижитель гелия постепенно и плавно понижается. Затем в работу включаются турбодетандеры криогенной гелиевой установки, а на последнем этапе охлаждения (от 10 до 4,5К) и при накоплении жидкого гелия в криостате подключается холодный поршневой детандер. Процесс протекает с оптимальной холодопроизводительностью. Вспомогательная азотная криосистема, входящая в общую систему криогенного обеспечения МГД-генератора, состоит из сборников жидкого азота, теплозащитных экранов криостата, азотных ловушек, криогенного хранилища жидкого азота, установки обратной конденсации паров азота после охлаждения соответствующих объектов. Масса запасаемого азота достаточно велика: в системе криогенного обеспечения МГД-генератора мощностью 100 МВт запасается до 50 т.

Системы криогенного обеспечения больших МГД-генераторов должны отвечать комплексу жестких требований. Причем иногда достаточно противоречивых. Так, для захлаживания оборудования при подготовке МГД-генератора к пуску необходимы большие холодильные мощности: при понижении температуры от 300К до 4,5К — 160—170 кВт. А в процессе криостатирования сверхпроводящей системы в рабочем режиме при 4,2—4,5К — всего 1000 Вт. Серьезные технические трудности связаны также с ожижением и хранением большого количества гелия и азота в процессе эксплуатации системы (для криостатирования МГД-генератора мощностью 500 МВт требуется более 20 т жидкого гелия). Весьма важны также требования к продолжительности непрерывной работы (свыше 10 тыс. ч), к ресурсу (более 10 лет), к уровню автоматизации управления и контроля и т. д.

Криогенное обеспечение сверхпроводящих погруженных магнитов. Такие магнитные системы применяются в различных сверхпроводящих устройствах — например, в небольших МГД-генераторах, ионных ловушках и т. д. В общем виде погруженная сверхпроводящая магнитная система представляет собой электромагнит, который помещен непосредственно в криостат с жидким гелием (при соответствующих давлении и температуре). Иными словами, охлаждение с надежной криостатической стабилизацией осуществляется благодаря естественной конвекции жидкого гелия и достаточно высоким значениям

тепловых потоков его пузырькового кипения. Так что простота схемы охлаждения — безусловное преимущество погруженных сверхпроводящих магнитных систем (ПСМС).

Рассмотрим для примера ПСМС МГД-генератора ИМ-114. Это цилиндрический криостат со встроенным сверхпроводящим магнитом. Криостат заполнен жидким гелием. Горизонтальный рабочий МГД-канал проходит в центре криостата. Криостат защищен от внешнего потока теплоты высоковакуумной теплоизоляцией с азотным экраном.

Сам криостат по конструкции разборный — для облегчения доступа к магниту. У криостата два токовода и криовводы для подачи жидкого гелия. Его рабочий объем — свыше $1,5 \text{ м}^3$, общая масса (с магнитом) — $6,5 \text{ т}$, рабочая температура магнитной системы — $4,5 \text{ К}$, объем заливаемого жидкого гелия — $1,5 \text{ м}^3$. Система криообеспечения включает две серийные гелиевые установки типа КГУ-250, блок теплообменников для охлаждения криостата, резервуары для хранения жидких гелия и азота и другие узлы. Для безопасности работы с МГД-генератором система криообеспечения ИМ-114 имеет дистанционное управление.

Еще один пример ПСМС — сверхпроводящая магнитная система установки ЛИН-5Б с открытой ионной ловушкой для исследования управляемых термоядерных реакций. Ее криостат — сосуд для жидкого гелия и охлаждаемых жидким азотом радиационных теплозащитных экранов. Остроумная особенность конструкции: криовводы гелия одновременно выполняют функции подвесок электромагнита. Рабочий объем криостата — 6 м^3 , масса (с ловушкой) — 6 т , рабочая температура магнитной системы — $4,2\text{--}6 \text{ К}$. По условиям накопления плазмы в ионной ловушке (в рабочем режиме) давление не должно превышать $1 \cdot 10^{-8} \text{ Па}$. Чтобы получить столь малое давление, радиационные экраны криостата при откачке подогреваются до 673 К .

Закljučая тему криогенного обеспечения сверхпроводящих устройств, рассмотрим криообеспечение циркуляционных сверхпроводящих магнитных систем термоядерных установок «Токамак». В них несущие витки катушек электромагнита охлаждают циркулирующим по каналам гелием (в двухфазном или сверхкритическом состоянии).

Первой в мире термоядерной установкой со сверхпроводящими катушками основного магнитного поля является советская установка «Токамак-7». На ней можно проводить эксперименты по удержанию и нагреву водородной плазмы в рабочей камере объемом до 3 м^3 . Циркуляционная магнитная система «Токамак-7» состоит из 48 катушек. В намотанной на них девятиканальной шине из электролитической меди — токонесущие ниобий-титановые провода и охлаждающие гелиевые каналы. Система в виде тора помещается внутри криостата (внешний радиус корпуса криостата — 122 м). Силовой распорный каркас криостата образуют алюминиевые корпуса, в которых размещены катушки. Кожух криостата состоит из отдельных элементов, что позволяет быстро собирать и разбирать его. Во внутреннее тороидальное пространство криостата встроена рабочая сильфонная камера, где удерживается и нагревается водородная плазма.

Устройство криогенного обеспечения для захолаживания и криостатирования циркуляционной сверхпроводящей электромагнитной системы «Токамак-7» отводит внешний теплоприток импульсных тепловыделений от нагрева обмотки наводимыми плазмой вихревыми токами и охлаждает два токовода. Главный элемент системы — установка ОРГ-100—250/4,5, специально созданная для «Токамака-7». Это многорежимный гелиевый ожижитель-рефрижератор, имеющий две детандерные, дроссельную и эжекторную ступени охлаждения и работающий по циклу среднего давления с предварительным охлаждением гелия жидким азотом.

Система криогенного обеспечения «Токамак-7» может работать на разных режимах. При выведении установки на рабочие параметры переход с одного режима работы на другой осуществляется непрерывно. Перед началом испытаний ОРГ-100—250/4,5 выводятся на оптимальный рабочий режим с помощью имитатора нагрузки.

Помимо ОРГ-100—250/4,5, система криогенного обеспечения включает накопитель жидкого гелия РЦВГ-1,25/0,07 (т. е. объемом $1,25 \text{ м}^3$ и с избыточным давлением $0,07 \text{ МПа}$), а также криогенную азотную систему для криостатирования активных частей установки при 80 К и для обеспечения гелиевой системы жидким азотом. Общее время непрерывной работы системы

криогенного обеспечения «Токамак-7» превышает 1500 часов.

Тороидальная камера «Токамак-15» по конструкции не отличается от камеры «Токамак-7», однако она, как и вся установка, значительно больше по размеру. Это в значительной мере определяет и особенности ее системы криогенного обеспечения.

Технологическая схема криогенного обеспечения установки «Токамак-15» сложная и разветвленная, что связано с ее назначением — выполнением весьма разнообразных функций по криостатированию. Основные объекты криостатирования установки «Токамак-15» — это сверхпроводящая обмотка тороидального магнитного поля, сверхпроводящие магниты системы сверхвысокочастотного нагрева плазмы, криоконденсационные панели камеры инжекторов быстрых нейтронов, которые используются в качестве дополнительного средства нагрева плазмы. Все они сами по себе довольно сложны и чувствительны. Так, сверхпроводящая обмотка тороидального поля состоит из 24 соленоидов, обмотка каждого из них — из 12 параллельно гидравлически соединенных «галет»; обмотки циркуляционно охлаждаются гелием при криотемпературах. Далее, «галеты» наматываются сверхпроводящей шиной из интерметаллоида в медной матрице, в которой по двум параллельным трубкам и циркулирует криоагент.

Для сверхвысокочастотного нагрева плазмы используется 24 независимо работающих МЦР-генератора, в каждом из которых — один сверхпроводящий и два теплых (коллекторный и корректирующий) соленоиды. Сверхпроводящие соленоиды — «погруженные» (каждый в отдельном криостате).

Камеры инжекторов быстрых нейтронов оснащены системой криоконденсационной вакуумной откачки с использованием жидкого гелия.

Таким образом, криообеспечение — это основная криогенная гелиевая установка (ОРГ-300—1800/4,5) и три автономных блока, криостатирующих соответственно: сверхпроводящую обмотку тороидального поля, МЦР-генераторы в системах СВЧ-нагрева, криоконденсационные панели инжекторов быстрых нейтронов. Гелиевая установка, работающая в оживительном режиме, подает жидкий гелий в данные блоки. В качестве источников циркуляции гелия вместо механических на-

сосов используются надежные и простые в эксплуатации струйные эжекторы.

При работе криогенной системы установки «Токамак-15» винтовые компрессоры подают газообразный гелий (под давлением 2,5 МПа) в блок осушки и очистки от капель масла, откуда он поступает в агрегат предварительного охлаждения, где благодаря жидкому азоту его температура понижается до 80К. Затем после низкотемпературной адсорбционной очистки от примеси воздуха поток гелия делится на три части. Одна направляется на дальнейшее охлаждение и ожижение, вторая и третья — в блоки криостатирования соответственно сверхпроводящей обмотки тороидального поля и инжекторов быстрых нейтронов. Ожиженный гелий также делится на три потока и идет в два вышеупомянутых блока криостатирования и в резервуар системы криостатирования сверхпроводящих соленоидов МЦР-генераторов.

В блоке криостатирования сверхпроводящей обмотки тороидального поля (РГ-2000/4,5) обмотки охлаждаются потоком двухфазного гелия; он после охлаждения в теплообменнике жидким, кипящим при атмосферном давлении гелием с помощью циркуляционного эжектора подается в раздаточный коллектор. После охлаждения обмоток гелий через сбросный коллектор поступает в специальный сборник; пары отсюда возвращаются в блок криостатирования, а жидкость — в теплообменник. Следует отметить, что компенсируются максимальные тепловые возмущения увеличением потока криоагента на блок, что позволяет довольно просто регулировать работу системы при нестационарных тепловых нагрузках.

Блок криостатирования инжекторов быстрых нейтронов РГ-700/3,5 по технологической схеме аналогичен РГ-2000/4,5. Но он дополнительно оснащен сепаратором для откачки жидкого гелия в объекты криостатирования.

Наконец, криостатирование 24 погруженных сверхпроводящих магнитов МЦР-генераторов осуществляется от питательного резервуара с жидким гелием, где автоматически поддерживается его уровень (через контур с естественной циркуляцией). Излишние пары гелия из питательного резервуара поступают в блок криостатирования установки РГ-2000/4,5 и оттуда — в криогенную гелиевую установку.

В целом криогенная гелиевая установка ОРГ-300—1800/4,5 обеспечивает охлаждение криоагента и сверхпроводящих объектов и их криостатирование при температуре 4,5К в различных необходимых соотношениях нагрузок. Добавим к сказанному, что криогенная гелиевая система «Токамак-15» имеет две установки ОРГ-300—1800/4,5.

Жидким азотом установка «Токамак-15» питается от специальной азотной криосистемы (холодопроизводительность: в рабочем режиме охлаждение — 105 кВт, в максимальном режиме — 165 кВт; уровень температуры — 80К).

КРИОТЕРМОВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ (КТВУ).

Наиболее широко они применяются в настоящее время в космической технике. С помощью КТВУ в наземных условиях отрабатываются и испытываются системы и элементы космических летательных аппаратов — тренажеры для экипажей космических кораблей, а также летного состава авиации. Они стали буквально незаменимыми при научных исследованиях в области термоядерного синтеза, изучении перспективной технологии вакуумного переплава и новых методов сварки в вакууме, в ряде медико-биологических исследований и т. д. Они используются в электронной промышленности при производстве проводников и т. д.

Фактически в КТВУ моделируется космический вакуум. Следовательно, требуется достичь высокого вакуума в больших объемах, организовать тепловую имитацию космических условий, откачивать из камеры большое количество постоянно попадающих в нее частиц, обеспечить прочность корпуса камер в условиях постоянно действующего на них большого давления. В систему вакуумирования крупных КТВУ входит мощная форвакуумная система. В начальный период откачки в условиях интенсивного газовыделения со стенок камеры, испытываемого объекта и внутривакуумного оборудования удаляется основная масса газа. Высоковакуумная система большой производительности (с ее помощью получают и в течение длительного времени поддерживают рабочий вакуум) — система, которая позволяет добиваться стерильности остаточной газовой среды. Это необходимо, чтобы исключить «загрязнение» камеры и элементов испытываемого объекта. Коротко охарактеризуем эти элементы КТВУ.

Форвакуумная откачка происходит в два этапа. На первом используются эжекторные, жидкостно-кольцевые, винтовые и центробежные вакуумные насосы. Хорошо зарекомендовали себя в отечественной практике агрегаты из жидкостно-кольцевых насосов и сверхзвуковых воздушных эжекторов. На этой технике мы не будем останавливаться, так как для темы настоящей брошюры основной интерес представляют «средства» второго этапа форвакуумной откачки — криоадсорбционные насосы. Они просты по конструкции и по обслуживанию при эксплуатации, работают бесшумно и очень надежны. Важно отметить, что при возрастании давления в камере (например, в случае ее частичной разгерметизации) быстрота действия криоадсорбционных насосов возрастает, т. е. они саморегулируются.

Наиболее распространены два типа форвакуумных адсорбционных насосов — погружные и заливные. С их особенностями читатель может познакомиться в специальных технических справочниках на примере, скажем, таких моделей, как Р-10 и Р-50 (погружные) и ЦВН-1,5—3 и ЦВН-0,3—2 (заливные). Их недостатки — сравнительно узкий диапазон рабочих давлений и необходимость использовать гранулированный адсорбент (из-за опасности запыления вакуумируемого объема). Более того, гранулы адсорбента могут разрушаться в процессе работы насоса, что грозит запылением камеры. Поэтому в гранулах повышают содержание связующего вещества, но это ухудшает емкостные и кинетические характеристики адсорбента.

Справиться с этими недостатками криоадсорбционных вакуумных насосов помогла разработка эффективных (как в области низкого, так и в области высокого вакуума) малогабаритных средств тепловой защиты, например непрозрачного экрана, спеченного из порошка фосфористой меди, бронзы, титана. Из-за большой пористости и высокого коэффициента теплопроводности он обеспечивает высокую молекулярную проводимость и отсюда свободный доступ газа к адсорбенту, а также эффективное охлаждение как адсорбента, так и самого экрана. В оптически непрозрачной пористой структуре экрана тепловая энергия активно поглощается независимо от способа ее переноса. Поэтому такой экран, образующий вместе с криогенной поверхностью замкнутую полость, внутри которой находится адсорбент, надежно

предохраняет последний от теплоты, излучаемой стенами камеры и переносимой газом. А сама камера так же надежно защищена от опасности запыления частицами адсорбента.

Адсорбент надо периодически обновлять. Прежде это было связано с казавшейся неизбежной необходимостью периодически останавливать насос. Сегодня вибротранспортеры стали непрерывно перемещать адсорбент из рабочей зоны в зону его регенерации. Еще более технически остроумным было предложение использовать в насосах в качестве адсорбента угольную ленту, непрерывно перемещающуюся (подобно ленте транспортера) из рабочей зоны в зону регенерации и обратно.

Следующая группа элементов в системе аппаратов КТВУ предназначена для высоковакуумной откачки и поддержания в камере рабочего вакуума. В крупных КТВУ с давлением от 10^{-1} до 10^{-3} Па (высокий вакуум) применяются комплексные встроенные конденсационные насосы. Криогенный гелиевый насос состоит из трубчатых алюминиевых профилей, через которые пропускается холодный газообразный гелий (12—19К). При температуре поглощающей поверхности крионасоса ниже 30К начинается интенсивная откачка в области высокого вакуума. Со стороны корпуса насос защищен алюминиевыми панелями, а со стороны испытываемого объекта — непрозрачной оптически шевронной решеткой. Охлаждаются они жидким азотом. Затраты на защиту вполне оправданны, так как позволяют экономить дорогостоящий гелиевый холод.

В реальных космических аппаратах функционирование системы жизнеобеспечения требует выброса газов и паров из аппарата в космическое пространство. При отработке конструкции и проверке образцов необходима аппаратура, имитирующая условия такого выброса. Когда пары и газы попадают в рабочее пространство вакуумной камеры, на холодных поверхностях образуются криоосадки, значительно меняющие оптические характеристики этих поверхностей. Поэтому стали использовать встроенные в вакуумную камеру охлаждаемые азотом криогенные панели в качестве основного откачивающего средства для удаления легкоконденсируемых компонентов. Если по условиям эксперимента выброс легкоконденсируемых паров в пространство между стенкой камеры и криогенным экраном вообще нежелателен,

используются дополнительные автономные средства откачки, в частности криоконденсационный насос-десублиматор.

До сих пор речь шла об имитации в КТВУ условий космического пространства по давлению. Однако для полноценного испытания и отработки космических аппаратов необходимо обеспечить также соответствие условий в КТВУ космическим и по температуре. (Конечно, добиться полного теплового соответствия космосу практически невозможно; речь идет о максимально возможной точности тепловой имитации.) В значительной мере это зависит от качеств теплопоглощающих экранов, являющихся также тепловой защитой криоконденсационных насосов.

Самый простой теплопоглощающий экран (он собирается из плоских элементов, образующих сплошную стену) используется для защиты от радиационных потоков небольшой плотности. В мощных КТВУ с интенсивными радиационными потоками эффективно работают экраны, собранные из элементов шевронного типа. При этом очень важна геометрия решетки экрана. Именно от нее зависит, насколько хорошо он будет выполнять предъявляемые к нему достаточно противоречивые требования: пропускать максимум молекул откачиваемых грузов к криоконденсирующим гелиевым панелям и в то же время сводить к минимуму радиационный поток к гелиевым панелям.

При испытаниях космической аппаратуры в имитирующих космос условиях больших КТВУ на теплопоглощающие аппараты приходится огромная нагрузка от имитаторов Солнца, планет и т. д. Система охлаждения экранов должна надежно отводить теплоту. Ведь если температура поверхности экрана повысится на 7—10К, часть криоосадка может испариться, и вакуум в камере будет нарушен. Подчас приходится затрачивать десятки тысяч киловатт-часов электроэнергии на работу аппаратов системы охлаждения.

Имитирующая Солнце и планеты аппаратура может включаться и выключаться. При постоянном же действии может изменяться мощность излучения, а исследуемый аппарат вращается на поворотном столе, отражая различными своими частями (а значит, неодинаково) все эти виды излучений. Иными словами, тепловая нагрузка на теплопоглощающие экраны все время меняет-

ся. Понятно, что расчеты, учитывающие особенности таких условий, чрезвычайно сложны. Сложность усугубляется еще одним обстоятельством: при переходных процессах (от одного значения тепловой нагрузки на другое) между изменением воздействия на систему и реакцией системы на это изменение имеет место запаздывание, что также должно быть непременно учтено при расчете параметров теплозащитных систем.

КРИОГЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ. Инертные газы — аргон, гелий, неон, криптон, ксенон — широко используются в современной технике. Они применяются в различных технологических процессах таких отраслей, как металлургия, машиностроение, химия, энергетика, в качестве рабочих веществ и как эффективные защитные среды. Криогенного производства инертных газов мы вскользь уже коснулись — при разговоре о воздухоразделительных установках. Однако значимость этого направления в использовании криогенной техники требует, по нашему мнению, остановиться на данном вопросе особо.

Криогенное производство аргона. В современной промышленной практике сырой аргон получают на воздухоразделительных установках высокого, среднего и низкого давления, оснащенных дополнительным оборудованием. Для примера рассмотрим работу колонны сырого аргона во ВРУ высокого давления типа КЖАР-1,6. Она снабжена 60 ректификационными тарелками и верхним конденсатором. В кубовую часть колонны по двум вводам поступает газообразная аргонная фракция. Сырой аргон отбирается из-под крышки конденсатора, в межтрубное пространство которого подается переохлажденная кубовая жидкость.

Коэффициент извлечения аргона у промышленных установок колеблется в довольно широких пределах: от 0,35—0,55 (установки низкого давления) до 0,7—0,8 (установки высокого давления с детандером). Основные надежды на повышение коэффициента извлечения аргона из воздуха специалисты связывают с использованием систем автоматического регулирования. Они, в частности, уже весьма успешно применяются на отечественных установках. Разрабатывается система автоматического регулирования всех основных параметров.

Сырой аргон от примеси очищают различными методами. Наиболее прогрессивной и перспективной техно-

логией производства чистого аргона считается адсорбционный метод, особенно эффективный при низких температурах в сочетании с предварительной ректификацией.

Адсорбционное разделение смеси аргона и кислорода возможно потому, что критические размеры атома аргона и молекулы кислорода различны на $1 \cdot 10^{-10}$ м — величина, которой еще недавно оперировали лишь ученые-физики, исследующие процессы на атомном уровне, сегодня стала привычным параметром в технологии очистки аргона от кислорода. Принципиальная схема процесса очистки такова: смесь аргон—кислород проходит через адсорбент (например, синтетический цеолит), который при температуре 90К почти полностью поглощает кислород. Первая в Советском Союзе промышленная ВРУ с цеолитовым адсорбционным блоком для очистки аргона от кислорода начала эксплуатироваться в ПО «Ижорский завод» им. А. А. Жданова. С тех пор установки для криогенно-адсорбционной очистки аргона усовершенствовались, стали более производительными и надежными. Созданы также специальные установки для глубокой очистки аргона и других инертных газов, с тем чтобы получить газы так называемой «особой чистоты» (для проведения тонких физических исследований требуется, например, аргон, содержащий примесей не более $1 \cdot 10^{-6}$ в объемных долях).

К конструкции и качеству изготовления криогенных адсорберов для очистки инертных газов предъявляются весьма жесткие требования, что понятно: при сравнительно низком давлении в этих аппаратах они работают в условиях больших перепадов температур — от 70 до 750К, и это при полной герметичности! Кроме того, адсорберы для глубокой очистки инертных газов должны иметь возможность быстро нагревать и охлаждать значительные количества адсорбента низкой теплопроводности. Поэтому в цеолитовые адсорберы встроены меевики для подачи хладагента или теплоносителя.

Криогенное производство гелия. С помощью криогенной техники гелий получают из воздуха (вместе с неон), из природных газов и из искусственных газовых смесей (вместе с целой группой других инертных газов). В первом случае из воздухоразделительных установок отбирается неон-гелиевая смесь, затем конденсацион-

ным или криоадсорбционным методом эта смесь разделяется, после чего неон и гелий ожижаются.

Неоно-гелиевая смесь отбирается из верхней части конденсатора ВРУ; на этом этапе в ней всего от 3 до 10% чистых неона и гелия (остальное — азот, а также водород и следы кислорода). Далее газовая смесь под давлением поступает в дефлегматор, трубки которого охлаждаются жидким азотом. Здесь концентрация неона и гелия повышается до 40—70% — за счет удаления сконцентрировавшегося в трубках дефлегматора азота. То есть имеет место простой и типичный случай изотермической абсорбции, когда из смеси поглощается лишь один компонент (конкретно — азот). Для повышения концентрации неоно-гелиевой смеси в крупных ВРУ целесообразно использовать азот, кипящий в вакууме. Как показали исследования, при температуре 67К содержание инертных газов в смеси может составить 95,5%.

Дефлегматоры для получения инертных газов, которыми оснащены ВРУ, могут быть различных типов — пластинчато-ребристые, кожухотрубные. Для более полного удаления азота дефлегматоры вторичного обогащения совмещены с адсорберами (все узлы такого дефлегматора-адсорбера помещены в ванне с жидким азотом). Однако такое соединение целесообразно лишь для небольших аппаратов. Совмещать дефлегматор с адсорбером в аппаратах высокой производительности нерентабельно из-за сложности изготовления.

На разделении неоно-гелиевой смеси мы не будем останавливаться подробно. Скажем только, что и здесь на помощь приходит глубокий холод: технология разделения основана на том, что при температуре 77К адсорбируемость неона в 20 раз выше, чем адсорбируемость гелия. В последние годы наряду с криоадсорбционным методом разделения неоно-гелиевой смеси все шире начинает применяться конденсационный способ; его преимущества — возможность организации непрерывной переработки неоно-гелиевой смеси и возможность получать жидкий неон непосредственно из разделительной установки.

Гелионосные природные газы сегодня — основной источник гелия. В СССР такие газы добываются в Поволжье, Коми АССР и др. На гелиевое производство природный газ обычно подается по отдельному газопроводу. Он очищается от пыли, затем из него удаляются

двуокись углерода и влага. После этого газ подается на установку для производства сырого гелия. Принципиальная схема ее работы такова. Исходный газ поступает в предварительный теплообменник, где охлаждается до 245К, затем — в аммиачный теплообменник, в котором температура его снижается до 228К, и, наконец, в основной теплообменник — охлаждение до 163К. Под давлением до 1,1 МПа образовавшаяся парожидкостная смесь подается в первый противоточный конденсатор, из верхней части которого отбирается парогазовая смесь, содержащая до 3% гелия (жидкий остаток направляется в межтрубное пространство конденсатора в качестве хладагента). Нижняя часть второго противоточного конденсатора представляет собой змеевиковый теплообменник, в трубках которого под давлением 0,15 МПа испаряется кубовая жидкость, а в межтрубном пространстве конденсируется прямой поток и происходит обогащение газовой фазы до 30—50% гелия.

В верхней части второго конденсатора газовая фаза, наоборот, поступает в трубное пространство, в то время как в межтрубном пространстве азот кипит в вакууме (давление — 0,04 МПа, температура — около 70К); происходит дальнейшая конденсация газа.

После сушки обогащенная гелиевая газовая смесь сжимается мембранным компрессором до давления 15 МПа, охлаждается и освобождается (в сепараторе) от остатков тяжелых углеводородов. Сырой гелий (с концентрацией около 98%) поступает в блок тонкой очистки для дальнейшей переработки. Обычно блок представляет собой три—пять заполненных активированным углем адсорберов высокого и низкого давления. В одном адсорбере гелий очищается от примесей, во втором — регенерируется уголь, третий адсорбер охлаждается — подготавливается к рабочему режиму. Очищенный гелий (99,99% в объемных долях) проходит подогреватель и закачивается в баллоны.

Необходимо отметить, что установки для глубокой очистки гелия в больших количествах, естественно, значительно сложнее по конструкции, так как в этом случае резко возрастает значимость рекуперации теплоты, глубины осушки продукта и степени его очистки.

Криогенное производство криптона и ксенона. В настоящее время криптон и ксенон получают главным об-

разом в качестве побочных продуктов при производстве кислорода и азота. Криптон и ксенон — наименее летучие компоненты воздуха, и при разделении последнего они практически полностью конденсируются, накапливаются в кубе колонны высокого давления и вместе с кубовой жидкостью направляются в колонну низкого давления.

Дальнейший технологический процесс состоит из трех основных этапов: первый — выделение первичного концентрата с содержанием криптона и ксенона до 0,2%; второй — обогащение первичного концентрата с одновременным удалением из него взрывоопасных углеводородных примесей, в результате чего получается чистая криптоно-ксеноновая смесь; третий — производство чистых криптона и ксенона разделением криптоно-ксеноновой смеси.

Первичный концентрат получают на ВРУ различных модификаций. Чистая криптоно-ксеноновая смесь — продукт криогенных промышленных установок УСК-1 и УСК-1М (усовершенствованная модификация). В последней используется блок комплексной очистки и осушки с двумя или четырьмя адсорберами, заполненными синтетическим цеолитом. Смесь сливается непрерывно, концентрация ее достигает 99,7% криптона + ксенона в объемных долях. Наконец, для разделения смеси на чистые криптон и ксенон используют различие температур их кипения (криптон — 119,80К, ксенон — 165,0КК). Поскольку даже на самых крупных ВРУ получают в сутки не более нескольких кубических метров криптоно-ксеноновой смеси, ее разделяют на установках лабораторного типа с использованием процессов фракционированной дистилляции, ректификации или криогенной адсорбции (в различных комбинациях).

Интересные разработки по технологии обогащения и разделения первичного криптоно-ксенонового концентрата проведены в НПО «Криогенмаш», где созданы установки типа БАК (блоки адсорбции криптона). Следует упомянуть и УАРК-1 (установку адсорбционно-ректификационного обогащения и разделения криптоно-ксенонового концентрата). Их описание читатель найдет в специальной литературе. Весьма перспективным специалисты считают и предложение ученых из ГДР получать криптон и ксенон ректификационно-абсорбционным ме-

тодом, используя растворимость тяжелых инертных газов в жидкостях, в частности во фреоне.

Криогенное производство инертных газов из искусственных газовых смесей. В промышленно развитых странах все большая часть необходимых в хозяйстве инертных газов начинает производиться из различных искусственных газовых смесей, и прежде всего из продувочных газов, образующихся при синтезе аммиака. В Государственном институте азотной промышленности разработана схема установки для получения аргона из газов продувки, основанная на применении метода адсорбции. В результате получают аргон чистотой не менее 98% (остальное — азот). После сушки аргон может быть полностью очищен от азота либо использован как основа для производства технического аргона (84—86%), который широко применяется в электроламповой промышленности.

На заводах «Лейна» в ГДР успешно эксплуатируется установка по переработке газов продувки синтеза аммиака производительностью 300 м³ аргона в час. Аналогичны по схеме установки фирмы «Мессер Гризхейм» (ФРГ).

Разработаны и эксплуатируются установки для получения из продувочных газов синтеза аммиака одновременно аргона и сырого гелия. Не вдаваясь в технические подробности, отметим, что в этих установках разделяемый газ дополнительно охлаждается до 30К для практически полного вымораживания азота и аргона. Затем гелиево-водородная смесь выводится в теплообменник, где водород конденсируется; на следующем этапе жидкий водород отделяется от газовой смеси, состоящей из 40% гелия и 60% водорода, которая направляется в установку тонкой очистки гелия. Потери холода в установке компенсируются за счет циркуляционного водородного цикла.

Криптона и ксенона в продувочных газах немного. Но при переработке продуктов разделения газовой смеси криптон и ксенон накапливаются. В целом затраты энергии на получение криптоно-ксеноновой смеси из продувочных газов в 5 раз меньше, чем при производстве ее из воздуха на ВРУ. Наибольших успехов в освоении и использовании нового метода получения криптона и ксенона как побочных продуктов производства аммиака добились специалисты ГДР.

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что продукты — это уникальное сырье для производства инертных газов; в них содержится более 15% аргона, а гелия, криптона и ксенона — в сотни раз больше, чем в воздухе.

КРИОГЕННЫЕ ХРАНИЛИЩА И КОММУНИКАЦИИ. Стартовый комплекс американской ракеты-носителя «Сатурн-V» оснащен криогенными хранилищами жидких кислорода, водорода и азота, общий объем которых превышает 10 тыс. м³. Жидкие и газообразные криогенные продукты в больших количествах применяются на предприятиях металлургической, машиностроительной, химической и других отраслей промышленности. А это сопряжено с необходимостью создания криогенных хранилищ для больших объемов криопродуктов. Ракетно-космические комплексы, обслуживающие космические ракеты с жидкостно-реактивными двигателями, которые используют в качестве горючего водород, а в качестве окислителя — кислород (оба при криогенных температурах), — «чемпионы» по объему криогенных хранилищ. Зато многие отрасли промышленности, как говорится, «берут числом» таких хранилищ. Одним словом, криогенное хранилище сегодня — весьма распространенное техническое устройство.

В состав обычного криогенного хранилища входят следующие основные компоненты: криогенные резервуары, криогенные трубопроводы, теплообменные аппараты, вакуумные агрегаты, запорная и регулирующая арматура, система контроля и управления. Кратко расскажем о них на примере типового криогенного хранилища.

Главный, основной элемент такого хранилища — криогенный резервуар (вертикальный, горизонтальный или сферический). Вертикальные резервуары состоят из внешнего и внутреннего сосудов, опирающихся на самостоятельные, независимые друг от друга стойки, которые передают их массу на фундамент. Внешний сосуд изготавливается из обычной углеродистой стали, внутренний — хранилище криогенного продукта — выполняется из стали нержавеющей. В пространство между сосудами помещается теплоизоляция — порошково-вакуумная (для хранилища на 3—8 м³ криопродуктов), экранно-вакуумная (для более крупных хранилищ вместимостью 25—63 м³ криопродукта).

Горизонтальные криогенные резервуары (объем хранимого криопродукта — 100 и 225 м³) также состоят из внешнего и внутреннего сосудов, но масса внутреннего сосуда и находящегося в нем криопродукта передается на внешний через подвески, крепящиеся к опорным поясам внешнего сосуда, а уже через них — на фундамент. Теплоизоляция в межстенном пространстве — экранно-вакуумного типа. В отличие от вертикального горизонтальные криогенные резервуары, несмотря на большие габариты, можно перевозить железнодорожным транспортом. Сферические резервуары, подобно вертикальным, имеют отдельные опоры внутреннего и внешнего сосуда — из труб, расположенных одна в другой. Теплоизоляция — экранно-вакуумная. Высокий вакуум в пространстве между стенами внешнего и внутреннего сосудов криогенных резервуаров поддерживается криоадсорбционными насосами: в вертикальных и горизонтальных резервуарах — встроенными в межстенное пространство, в сферических — выносными.

Трубопроводы для транспортировки криопродуктов — основа магистралей криогенных хранилищ. Их длина может достигать в крупных хранилищах нескольких километров. Состоят они из отдельных нормализованных секций, те, в свою очередь, — из таких элементов, как прямые участки, колена, тройники, металлорукава, адсорбционные участки, муфты, компенсаторы, внешние опоры и пр. Из таких унифицированных элементов может быть смонтирована коммуникация любой необходимой конфигурации, любой длины.

Участок криогенной трубопроводной магистрали имеет общую вакуумную теплоизоляционную полость. Каждый такой участок может также оборудоваться элементами трубопровода с адсорбционным насосом.

Для управления технологическими операциями во время эксплуатации криогенного хранилища используется криогенная арматура — регулирующая, запорная, дренажная, предохранительная и пр. Она оснащается различными приводами в зависимости от необходимости (ручным, пневматическим, электрическим). Для криогенных хранилищ разработаны специальные конструкции встроенных запорных и регулирующих клапанов с пневмоприводом, угловой вентиль, шарнирно связанный с кожухом и др.

Для функционирования криогенных хранилищ, как,

впрочем, и другого криогенного оборудования, огромное значение имеет точность соблюдения параметров процесса предварительного охлаждения, или захлаживания. Это и понятно: перед приемом жидких криопродуктов стенки резервуаров и трубопроводов имеют практически ту же температуру, что и окружающая среда. Поэтому на начальной стадии захлаживания здесь создается режим пленочного кипения. При значительном понижении температуры стенок возникает возможность контакта с ними криопродукта; на этом этапе устанавливается режим пузырькового кипения. Далее, при сближении показателей температуры стенок и температуры жидкого криопродукта пузырьковое кипение сменяется конвективным теплообменом.

Захлаживание должно быть плавным и постепенным. При резких изменениях температуры стенок возникают сильные термические напряжения, способные разрушить устройство. Интересно отметить, что для хранилищ различных габаритов и трубопроводов различной напряженности используют свои, особые аналитические расчеты режимов захлаживания. Без этих расчетов и соблюдения правил, на них базирующихся, эксплуатация современных сложных и разветвленных систем хранения, подачи, заправки криопродуктов просто невозможна.

Особенно важна для эксплуатации криогенных хранилищ и систем коммуникаций криопродуктов надежность теплоизоляции. Тепловая изоляция современного криооборудования — вакуумные системы: порошково-вакуумные и слоисто-вакуумные. Они универсальны: вакуумные теплоизолирующие оболочки могут быть толщиной от 2—3 мм (для защиты криопродуктов в объеме нескольких десятков кубических сантиметров) до десятков сантиметров (для защиты криопродуктов в объемах сотни и тысячи кубометров).

В простейшем случае вакуумная теплоизоляция представляет собой вакуумированную полость, заполненную мелкодисперсным порошком, экранирующим как излучение теплоты, так и молекулярный тепловой перенос через вакуум. Наиболее эффективна слоисто-вакуумная теплоизоляция — вместо порошка применяется система экранов, разделенных прокладками из низкотеплопроводного материала. Ее считают весьма перспективной.

Что представляет собой отечественная система

СВТИ? Экраны — из полиэфирной пленки, на которую с двух сторон нанесены (вакуумной металлизацией) слои алюминия. Толщина слоя — 500 Å, что соответствует минимуму коэффициента теплового излучения алюминиевого покрытия. Прокладки — тонковолокнистые стекломатериалы, причем волокна ориентированы в плоскости слоя; это позволяет получить минимальные характеристики теплопроводности в поперечном направлении. Используемая в изоляции стеклобумага (толщина волокон — 1 мкм, содержание связующей субстанции — до 3%) способствует снижению газовыделений в толще изоляции, что повышает на 20% эффективность изоляции. Элементы изоляции монтируются по специально разработанной схеме, что позволило добиться минимальных механических нагрузок на изоляцию (это очень важно, так как механические нагрузки заметно снижают показатели теплового сопротивления изоляции). В тех случаях, когда необходимо сократить время достижения вакуума внутри изоляционных слоев (например, для летных ракетных баков с криогенными компонентами горючего), применяется перфорация экранов. Результатом всех этих новшеств было создание конструкций слоистой экранно-вакуумной теплоизоляции (СВТИ) с высокими показателями эффективности тепловой защиты. При подобной изоляции потери в процессе хранения и транспортировки по трубопроводам криопродуктов минимальны.

Однако в случаях длительного хранения криопродуктов при любой теплоизоляции процесс испарения вследствие притока теплоты все же происходит. Открытый газосброс означает потери части продукта. Специалисты считают перспективным бездренажное хранение. Но в этом случае приходится иметь дело с температурным расслоением жидкости: ее поверхностные слои нагреваются значительно больше основной массы, а это вызывает более резкое увеличение давления. Понятно, что подобное явление значительно сокращает допустимые сроки бездренажного хранения криопродуктов. Теоретические и экспериментальные работы в данной области дали существенные результаты. На их основе советскими специалистами предложены оригинальные конструкции резервуаров и методы их заполнения, которые практически исключили температурное расслоение в хранимых жидких криопродуктах.

КОРОТКО О ЗАЩИТЕ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ.

Прежде всего в общих чертах познакомим читателя с методами защиты сверхпроводящих устройств при внезапной (аварийной) потере последними сверхпроводимости. В практике эксплуатации сверхпроводящих устройств такие случаи возможны, причем это может повлечь за собой весьма серьезные последствия. Так, например, при потере сверхпроводимости охлаждаемых жидким гелием погруженных магнитов в очень короткий промежуток времени (до 27 секунд) запасенная энергия (до сотен мегаджоулей) выделяется в виде теплоты в криостате. Жидкий гелий быстро нагреется и испарится, быстро возрастет давление в криостате (до 2 МПа), что разрушит и криостат и магнитную систему. Криостатами, способными выдержать такое давление, техника не располагает — их создание совершенно нерентабельно из-за слишком большой массы и высокой металлоемкости. Однако случаи аварийного выхода устройств из состояния сверхпроводимости возможны, а значит, техника должна была найти — и нашла — средства борьбы с их последствиями.

Способов защиты сверхпроводящих магнитов, основанных на недопущении выделения в криостате всей запасенной энергии, довольно много. Но мы остановимся здесь лишь на некоторых из них — на тех, которые, по мнению ведущих советских специалистов, наиболее надежно гарантируют защиту системы от разрушающих воздействий.

Вот, например, одно из устройств, предохраняющих и криостат и магнит от последствий внезапной потери сверхпроводимости, основанное на правильном соотношении объемов — объема, занимаемого гелием под защитной оболочкой, и объема парового пространства криостата. Если соотношение таково, что после вытеснения жидкости из-под оболочки криостат не переполняется жидкостью, аварии не случится. Система этого типа для тепловой защиты сверхпроводящего устройства методом аварийной эвакуации гелия использована в отечественной технике, например при разработке и изготовлении МГД-генератора мощностью 100 МВт с гелиевым криостатом.

Когда речь идет о небольших МГД-генераторах, снабженных криостатом сравнительно малого объема, защита при аварийном выходе системы из состояния сверх-

проводимости может быть решена более простым способом, а именно снабжением криостата предохранительной мембраной и сбрасывающим патрубком. При опасном росте давления мембрана лопается и гелий через патрубок выбрасывается в атмосферу. Этот метод требует выполнения определенных условий. Необходимо точно рассчитать прочность мембраны (и тем самым момент открытия предохранительного устройства), а также сечение сбрасывающего патрубка. Дело в том, что слишком широкий патрубок неизбежно вызывает увеличение теплопритока в холодную зону.

Член-корреспондент АН СССР В. П. Беляков приводит такие условия и последовательность расчета оптимального течения сбрасывающего патрубка для защиты криостата сверхпроводящих магнитов.

1. На основании предварительных оценок и прогнозирующих расчетов определяется величина максимального теплового потока от обмотки к криоагенту (гелию).

2. Процесс передачи тепловой энергии от обмоток к гелию делится на два этапа (а точнее — на два различных термодинамических процесса). Первый — нагрев гелия с начала процесса тепловыделения до открытия предохранительного устройства (мембрана — сбрасывающий патрубок) при заданном давлении. И второй — подвод теплоты после открытия предохранительного устройства к телу переменной (уменьшающейся) массы при постоянном давлении в криостате.

3. На этом втором этапе исследуемого процесса определяют объем гелия, который в каждый момент времени должен удаляться из криостата. На этой основе, в свою очередь, определяется максимальное сечение сбрасывающего патрубка, которое позволило бы сохранить неизменным давление в криостате при ранее определенном тепловом потоке.

Следует иметь в виду, что объем сбрасываемого гелия и соответственно сечение патрубка в принципе могут уменьшиться за счет более высокого заданного давления, при котором лопается мембрана. Однако это неизбежно влечет за собой увеличение допустимого расчетного давления в криостате. Понятно, что такое решение в большинстве случаев нежелательно.

Необходимо отметить еще один момент: при двухфазном состоянии гелия требуемый сброс ниже, чем при

однофазном, т. е. при полном испарении жидкости. И если защитный процесс организовать так, чтобы большая часть энергии (в идеальном случае — вся энергия), выделяемой магнитом, передавалась гелию до его полного испарения и возникновения максимального давления в криостате и необходимости максимального аварийного сброса, сечение сбрасывающего патрубка можно определять по более экономному расходу. Иными словами, расчет расхода при двухфазном состоянии криоагента позволяет существенно снизить показатель требуемого сечения сбрасывающего патрубка без увеличения расчетного давления в криостате.

Несколько слов о защите воздухоразделительных установок низкого давления от взрывов. Наиболее вероятным очагом взрыва в ВРУ низкого давления следует считать аппаратуру узла ректификации с кипящим кислородом. Взрывы (от локальных, едва заметных до сильных, приводящих к разрушению аппаратуры) происходят вследствие накопления поступающих вместе с перерабатываемым воздухом взрывоопасных примесей — ацетилена, метана, пропана, углеводородов и др. Критические условия, чреватые взрывом, возникают при определенных показателях концентрации взрывоопасных примесей — при образовании на теплопередающих поверхностях аппаратов жидкого кислорода слоя таких примесей толщиной более 20—50 мкм и при четырехпроцентной их концентрации в объеме жидкого кислорода.

Для защиты ВРУ низкого давления от взрывов прежде всего используется очистка технологических потоков от взрывоопасных примесей. Для этой цели используются регенераторы и адсорберы, обеспечивающие значительное снижение концентрации примесей в кислороде, подающемся на конденсаторы-испарители. Кроме того, в циркуляционный контур конденсаторов-испарителей также включаются адсорберы, уменьшающие концентрацию взрывоопасных примесей уже в жидком кислороде. Наконец, разработан такой гидродинамический режим работы конденсаторов-испарителей, при котором накопление взрывоопасных примесей на теплоотдающих поверхностях аппаратуры исключается. Внедрение указанных средств защиты позволило добиться взрывобезопасной работы даже для крупных ВРУ низкого давления с продолжительным (более года) периодом непрерывной эксплуатации.

Определенные меры защиты необходимо принимать и при эксплуатации криогенных трубопроводов. Опыт их эксплуатации позволил убедиться в возникновении кратковременных повышений давления (гидроударов) в момент переключения циркуляции с одного контура на другой. Более того, статистический анализ сведений по эксплуатации криогенных хранилищ в промышленных условиях показал, что самой частой причиной выхода из строя оборудования служат именно гидроудары, возникающие в связи с появлением так называемых паровых плоскостей и с их последующим заполнением жидкостью. Сами же пароплоскости появляются из-за притока теплоты при временной остановке циркуляции (например, в тупиковых отводах трубопроводов или быстром закрытии запорно-регулирующей арматуры). Гидроудар в криогенном трубопроводе возникает и при открытии клапана. Дело в том, что полость перед закрытым клапаном вследствие притока теплоты через изоляцию и так называемые тепловые мосты в трубопроводе заполняется парами криоагента. Как только клапан открывается, давление в этой полости резко падает и поток жидкого криоагента начинает разгоняться, заполняя ее. Но при подходе жидкости непосредственно к клапану ее поток резко тормозится (так как пропускная способность клапана в отношении жидкости значительно ниже, чем в отношении паров, — пропорционально отношению плотностей жидкости и пара).

Советские специалисты математически промоделировали указанный процесс. Не останавливаясь на этих расчетах подробно (их читатель сможет найти в специальной литературе), скажем только, что поставленная задача решалась на ЭВМ методом Коши—Эйлера. Затем правильность расчетов проверялась экспериментально на специально созданных стендах. На основе исследований были разработаны методы расчетов критических размеров паровой полости, законы срабатывания клапанов для различных систем и в целом методика защиты криогенных систем от гидроударов выбором оптимальных режимов их работы.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ. В 1982 г. американский журнал «Физикал ревью леттерс» опубликовал небольшую статью Блеза Кабреры — молодого ученого из Стенфордского университета. В ней был описан следующий эксперимент.

В сосуд с жидким гелием была помещена катушка ниобиевой проволоки. Затем в полученный таким образом сверхпроводник ввели порцию энергии; в катушке начал циркулировать электрический ток и циркулировал несколько месяцев без существенных изменений. Ток в катушке измерялся прибором со сверхпроводниковым датчиком, способным улавливать малейшие изменения магнитного потока. Это случалось, например, при добавлении, для компенсации естественных потерь, жидкого гелия в охлаждающую систему. Кроме того, прибор отметил до трех десятков «всплесков» магнитного потока. После случайных «всплесков» магнитный поток быстро возвращался к исходному уровню.

Но вот однажды ток в ниобиевой сверхпроводящей катушке резко возрос — магнитный поток увеличился в 8 раз! Объяснение экспериментатора: через катушку пролетел магнитный монополю, который навел в ней дополнительную ЭДС, что и привело к резкому возрастанию тока. Достоверность таких выводов Б. Кабрера оценил в 95%. Другие специалисты оценивают возможность ошибки при эксперименте Б. Кабреры значительно выше и предлагают подождать с признанием открытия. Не вдаваясь в суть этих споров, отметим: многие ученые все же считают, что общепринятое заявление: «Магнитный монополю, или монополю Дирака, т. е. отдельный, самостоятельный существующий «северный» или «южный» магнитный заряд, не обнаружен...» — теперь следует дополнить оговоркой: «...если не считать не абсолютно достоверных результатов эксперимента Б. Кабреры».

Магнитный монополю ученые с особой настойчивостью ищут с тех пор, как в 1931 г. Полю Дираку удалось ввести это понятие в теорию квантовой электродинамики и тем самым показать, что теоретически он может существовать. Магнитный монополю ищут в космических лучах и продуктах ядерных реакций, в метеоритах и лунных породах. Настойчивость этих поисков объясняется, в частности, тем, что без признания его наличия в реальном мире невозможна разработка проблемы объединения всех физических взаимодействий, доказательства их единой природы. Если все взаимодействия имеют одну основу (это так называемое «великое объединение»), то магнитный монополю обязательно должен существовать.

Иначе говоря, поиски доказательств существования

магнитного монополя в природе — одна из важнейших задач фундаментального естествознания. А рассказано здесь об этом, как, наверное, уже догадался читатель, потому, что открытие Б. Кабреры (пусть пока и не совершенно достоверное) сделано с помощью криогенной аппаратуры. Без нее сегодня в самых различных областях науки — фундаментальных и прикладных — серьезные эксперименты просто трудно себе представить.

А теперь еще об одном открытии — уже в области самой теории сверхпроводимости.

Как читатель, очевидно, знает, явление сверхпроводимости основано на том, что при криогенных температурах свободные электроны «слипаются» в пары. И эти пары электронов — носители электрического тока — движутся в проводнике, не встречая сопротивления. Однако такая пара — союз очень непрочный: стоит ей поглотить квант энергии, и пара распадается. В разных веществах наименьшая величина энергии, которая может быть поглощена спаренными электронами, различна.

Долгое время считалось, что наличие такой величины, физики называли ее «энергетической щелью», — неременное свойство любого сверхпроводника в любых условиях. Однако, как выяснили советские ученые, это не совсем так.

Исследователи изучили влияние на свойства сверхпроводника различных примесей и дефектов. Большинство из них, действительно, на энергетическую щель не влияло. По-иному проявили себя магнитные примеси. Чем больше таких примесей в сверхпроводнике — до определенного предела, — тем «уже» энергетическая щель. (Следует, однако, отметить, что при увеличении концентрации магнитных примесей в проводнике температурный порог, ниже которого возникает сверхпроводимость, уменьшается. И если примесей около 1%, сверхпроводимость вообще не может возникнуть. Так что «закрытие энергетической щели» — дело более чем ювелирное по своей тонкости и точности.)

Дальнейшие исследования обнаружили факты еще более любопытные: магнитное поле влияет на тонкие сверхпроводящие пленки подобно магнитным примесям. Магнитное поле в отличие от раз и навсегда введенных в проводник магнитных примесей можно менять. И управляя магнитным полем, можно получать сверхпровод-

ник с желаемым диапазоном изменения его характеристик.

Известно, что большие токи и большие магнитные поля могут «разрушить» сверхпроводимость. Описываемое открытие и на этом направлении подсказало путь к решению проблемы. Катушка сверхпроводящего электромагнита может быть сделана таким образом, что там, где магнитное поле образует так называемые «абрикосовские вихри», будет наблюдаться бесщелевая сверхпроводимость; это обеспечит нормальную работу устройства.

Способ борьбы с энергетической щелью в целях повышения надежности и производительности устройств и приборов, действие которых основано на явлении сверхпроводимости при криогенных температурах, найден членами-корреспондентами АН СССР А. Абрикосовым и Л. Горьковым. Их работа зарегистрирована как открытие Государственным комитетом СССР по делам изобретений и открытий.

Результаты фундаментальных исследований не сразу начинают внедряться в повседневную практику. Пройдет некоторое время, прежде чем открытие Абрикосова—Горькова обретет «материальную плоть» приборов и машин, используемых в различных областях народного хозяйства. Однако нет сомнения, что так будет: возможность управлять свойствами сверхпроводника слишком заманчива, чтобы научно-техническая мысль не постаралась в самое ближайшее время найти ей вполне утилитарное применение.

Примеров открытий, сделанных на разных направлениях научного поиска с помощью криогенной аппаратуры, а также теоретических разработок последних лет и технических решений на их основе в области самой криогеники можно было бы привести немало. Собственно, этому и посвящена в значительной своей части настоящая брошюра. Так что, видимо, нет нужды множить доказательства того положения, которым хотелось бы завершить эту беседу с читателем: криогеника — важнейшая и интереснейшая сфера современной науки и техники, и мы еще будем свидетелями замечательных новых свершений в этой области.

СЛОВАРЬ

Абсолютный нуль — начало отсчета абсолютной температуры, 0K; на 273,16K ниже температуры тройной точки воды (т. е. 0°C). Самая холодная, достижимая лишь теоретически температура вещества; из третьего начала термодинамики следует, что абсолютный нуль недостижим. Получение температур, предельно близких к абсолютному нулю, — чрезвычайно сложная техническая задача, однако в экспериментах получены температуры, которые лишь на миллионные доли градуса выше абсолютного нуля. Все вещества (кроме жидкого гелия) вблизи абсолютного нуля имеют упорядоченную кристаллическую структуру из-за стремящейся к нулю интенсивности теплового расширения.

Дьюара сосуд — емкость, в которой помещенное сюда вещество долгое время сохраняет постоянную температуру. Представляет собой колбу с двойными посеребренными стенками, из пространства между которыми выкачан воздух; теплопроводность разреженного газа между стенками ничтожно мала, что и служит надежной теплоизоляцией. Предложен английским ученым Дж. Дьюаром в 1898 г.; тогда же Дьюаром впервые был получен жидкий водород.

Кельвина шкала — часто употребляемое наименование термодинамической температурной шкалы, принцип построения которой предложен Кельвином в 1848 г. Термодинамическая температурная шкала с одной реперной точкой — тройной точкой воды — установлена X Генеральной конференцией по мерам и весам в 1954 г. За температуру тройной точки воды принята 273,16K, что соответствует 0,01°C. Таким образом, температура $t = 100K$ соответствует $t = -173,16^\circ C$.

Криобиология — раздел биологии, изучающий воздействие низких и сверхнизких температур (от 0°C до близких абсолютному нулю) на живые системы.

Криогенная электроника — направление науки и техники, охватывающее исследование взаимодействия электромагнитного поля с электронами в твердых телах при криогенных температурах (ниже 90K) и создание приборов на этой основе. Применение криогенных электрон-

ных элементов позволяет увеличить надежность приборов, уменьшить их габариты и вес, расширяет сферу их применения.

Криогенные усилители — низкотемпературные твердотельные усилители, характеризующиеся ничтожно малыми шумами. Основаны на различных физических явлениях. К ним относятся парамагнитный квантовый усилитель, параэлектрический усилитель, сверхпроводниковый усилитель и др.

Криогенные элементы — запоминающие и логические элементы ЭВМ, действие которых основано на явлении сверхпроводимости. Малогабаритны, просты по конструкции, дешевы, поглощают ничтожно малое количество энергии.

Криогенный насос — вакуумный конденсационный или сорбционный насос, откачивающее действие которого основано на поглощении газа поверхностью, охлажденной до криогенных температур.

Криостат — термостат, в котором исследуемый объект или рабочий узел содержится при криогенных температурах, получаемых за счет постороннего источника холода (хладагента). В качестве хладагента обычно используются сжиженные или отвержденные газы с низкими температурами конденсации и замерзания (азот, водород, гелий и др.). Иногда в один криостат помещают несколько электронных приборов. Криостат, помимо основного назначения, может выполнять дополнительные функции (например, служить антенной).

Криотрон — переключательный криогенный элемент, действие которого основано на свойстве сверхпроводников скачком менять свою проводимость под действием критического магнитного поля; может находиться только в одном из двух состояний — сверхпроводящем или с малой проводимостью. Именно с создания криотрона в 1955 г. началось развитие криогенной электроники.

Криохирургия — направление в хирургии, использующее для деструкции органов и тканей пациента, подлежащих удалению или разрушению, низкие температуры.

Сверхпроводимость — свойство многих проводников, за счет которого сопротивление при охлаждении ниже определенной критической температуры падает до нуля. Впервые обнаружена в 1911 г. Х. Камерлинг-Оннесом при наблюдениях на ртути. Этим свойством обладают

более 25 металлических элементов, многие сплавы, интерметаллические соединения и ряд полупроводников. Сверхпроводимость нашла широкое практическое применение, причем эта сфера постоянно расширяется (см. Криогенная электроника, Сверхпроводящие магниты, Сверхпроводящие магнитометры, Криогенный насос и др.).

Сверхпроводники — вещества, у которых при охлаждении ниже критической температуры (T_K) наблюдается явление сверхпроводимости. Еще одним важным параметром, характеризующим те или иные сверхпроводники, является величина критического магнитного поля, выше которой сверхпроводник переходит в обычное состояние, т. е. теряет сверхпроводимость.

Сверхпроводящий магнит — электромагнит с обмоткой из материала, который в состоянии сверхпроводимости обладает нулевым омическим сопротивлением. В замкнутой (накоротко) сверхпроводящей обмотке наведенный ток сохраняется сколь угодно долго; магнитное поле незатухающего тока лишено пульсаций и вообще исключительно стабильно. Работавший сверхпроводящий магнит помещается внутри криостата с жидким гелием. Используется в исследованиях электрических, оптических и магнитных свойств веществ, при изучении элементарных частиц, атомных ядер, плазмы.

Энергетическая щель — величина энергии, при поглощении которой спаренные электроны сверхпроводника разделяются; у разных веществ эта величина различна.

ЛИТЕРАТУРА

Беляков В. П. Криогенная техника и технология. — М.: Энергоиздат, 1982.

Бродянский В. М., Семенов А. М. Термодинамические основы криогенной техники. — М.: Энергия, 1980.

Головко Г. А. Криогенное производство инертных газов. — Л.: Машиностроение, 1983.

Жданов С. П., Хвощев С. С., Самулевич Н. Н. Синтетические неолиты. — М.: Химия, 1981.

Криогенное оборудование. Каталог. 2-е изд. — М.: ЦИНТИ-химнефтемаш, 1980.

Криогенные газовые машины. Сборник. — М.: Машиностроение, 1982.

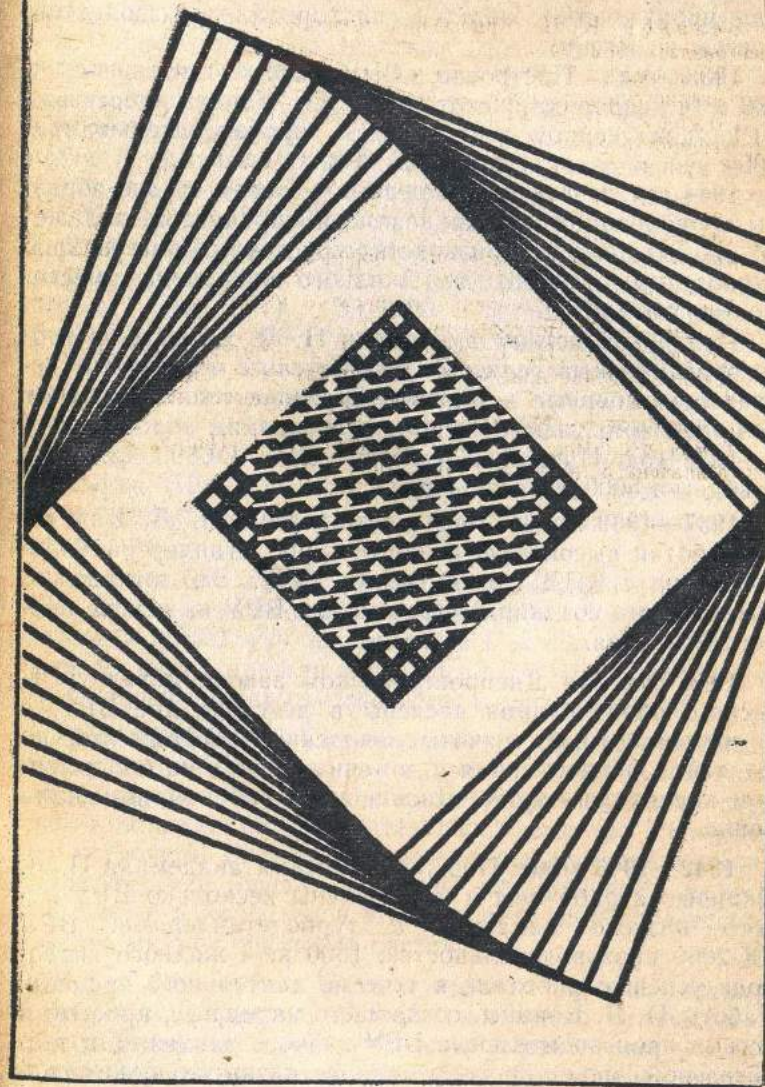
Линевег Ф. Измерение температур в технике. Справочник. Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1980.

Солнцев Ю. П., Степанов Г. А. Материалы в криогенной технике. Справочник. — М.: Машиностроение, 1982.

Харламов А. Г. Теплопроводность высокотемпературных теплоизоляторов. — М.: Атомиздат, 1980.

Химия цеолитов и катализ цеолитов. Т. 1, Пер. с англ. Под ред. Миначева Х. М. — М.: Мир, 1980.

РЕДАКЦИОННЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ



НЕМНОГО ИСТОРИИ

1932 год. В Советском Союзе создана первая воздуходелительная установка (ВРУ) производительностью 100 м³/ч газообразного кислорода. В этот же период были проведены работы по созданию установок для производства жидкого кислорода производительностью до 30 л/ч.

1933 год. Построена ВРУ производительностью 600 м³/ч кислорода чистотой 42% О₂. Начата работа над ВРУ для черной металлургии производительностью 5000 м³/ч кислорода чистотой 60% О₂.

1934 год. Изготовлены первые в нашей стране образцы оборудования для хранения криопродуктов, налажено промышленное производство криогенных резервуаров (криогенных танков) для жидкого кислорода вместимостью до 9 м³.

Под руководством академика П. Л. Капицы построен оригинальный гелиевый ожижитель с поршневым детандером; впервые в мировой практике гелий ожижают без предварительного охлаждения жидким водородом.

1935 год. Пущена в действие ВРУ Г-6800 для производства 5000 м³/ч кислорода.

1937—1939 годы. Под руководством П. Л. Капицы разработан высокоэффективный турбодетандер радиального типа с КПД, достигающим 82%. Это открывало возможность создания эффективных ВРУ на основе низкого давления.

1940 год. На Днепропетровском заводе металлургического оборудования введены в действие две ВРУ, с помощью которых начаты заводские эксперименты по выплавке ферросилиция в доменных печах на обогащенном кислородом дутье. Дальнейшим работам помешала война.

1942—1943 годы. Под руководством академика П. Л. Капицы разработаны и изготовлены несколько ВРУ одного низкого давления с турбодетандерами. ВРУ ТК-2000 производительностью 1500 кг/ч жидкого кислорода успешно работала в течение длительного времени. Работы П. Л. Капицы, создавшего надежные, простые и весьма производительные ВРУ низкого давления, в значительной мере предопределили развитие криогенной

техники на этом направлении во всей мировой научно-технической и промышленной практике.

1943 год. Создано Главное управление по кислороду (Главкислород); начальником его назначен П. Л. Капица, руководителем одного из ведущих отделов по использованию кислорода в металлургии — академик И. П. Бардин. Задача управления — координация работ различных организаций страны по созданию и внедрению в промышленную практику (прежде всего в металлургию) высокопроизводительных ВРУ. Главкислород способствовал значительному увеличению выпуска чугуна и стали, внедряя процессы интенсификации кислородом (с помощью криогенной техники) доменного, мартеновского и конвертерного производства; в годы Великой Отечественной войны это имело особое значение.

1947—1949 годы. Разработаны и изготовлены высокопроизводительные ВРУ КГ-300-2Д (производительностью 300 м³/ч), Кт-1000 (производительностью 1000 м³/ч) и Кт-3600 (производительностью 3600 м³/ч).

1955 год. На Новотульском металлургическом заводе сдается в эксплуатацию ВРУ БР-1 с эффективным турбодетандером производительностью 12 500 м³/ч кислорода. В 1958—1962 годах, выпущено пять модификаций установки БР-1 для нужд мартеновского, доменного и конвертерного производства, а также для химической технологии.

1963 год. На заводе «Азовсталь» введена в действие ВРУ БР-2 производительностью 24 000 м³/ч технологического и 11 000 м³/ч технического кислорода. В 1965 году ей на смену пришла установка БР-2М с упрощенным и усовершенствованным способом очистки воздуха.

1965—1970 годы. Сформировалось особое направление криогенной техники — микрокриогеника, основная задача которой — создание малогабаритных систем глубокого охлаждения чувствительных элементов электронных устройств. Разнообразные области применения (системы дальней связи, авиация, космонавтика и др.) обусловили разработку и производство широкого ассортимента микрокриогенных систем.

Конец 60-х годов. Начаты работы по техническому использованию сверхпроводимости с целью радикального улучшения характеристик электротехнического, энергетического и другого оборудования (увеличения удель-

ной мощности, повышения эффективности, уменьшения массы и габаритов и т. д.).

1968—1970 годы. Проведены научно-исследовательские опытно-конструкторские работы, позволившие создать экспериментальные образцы, а в начале 80-х годов освоить серийный выпуск криогенного гелиевого оборудования для лабораторных и полупромышленных исследований сверхпроводящих устройств.

1968—1972 годы. Освоено производство группы новых ВРУ — Кт-12—3, КтА-12—3, КтК-12, К-11—2 (производительностью до 12 000 м³/ч технологического и технического кислорода), АКт-17—1, АКт-16—2 (производительностью до 16 000 м³/ч технического кислорода и до 17 000 м³/ч чистого азота).

1975—1978 годы. Созданы криогенные системы для 100-метрового участка жесткого и 50-метрового участка гибкого сверхпроводящего кабеля. Разработана и изготовлена криогенная система для сверхпроводящей экспериментальной термоядерной установки «Токамак-7». Успешно развиваются разработки по созданию сверхпроводящих криосистем электрогенераторов, МГД-генераторов, электродвигателей и других устройств.

1978 год. Для домы объемом 5000 м³ Криворожского металлургического завода изготовлена ВРУ Кт-70 производительностью 66 000 м³/ч технологического кислорода.

1978—1979 годы. Изготовлены первые образцы ВРУ КА-15, КААр-15 и АКт-30 повышенной взрывобезопасности, перерабатывающие в час 85 000 м³ воздуха и обеспечивающие производство чистого и сухого кислорода и азота.

1975—1980 годы. Созданы образцы КГМ со свободным вытеснителем (в отечественных конструкциях вытеснителем служит газовый столб).

МОЗАИКА ДЛЯ ЛЕКТОРА

До сих пор различные препараты (медицинские, биологические и др.), которые необходимо хранить при сверхнизких температурах, перевозили в пробирках, погруженных в жидкий азот, которым заполнен сосуд Дьюара. Однако жидкий газ при неизбежных во время транспортировки толчках и наклонах выплескивается: сосуд Дьюара закрывать нельзя — жидкий газ постоянно испаряется и выбивает любую пробку.

Специалисты лаборатории фирмы «Шотт» (ФРГ) предложили помещать в сосуд Дьюара цилиндр из пористого стекла (размер пор — от 0,01 до 1 мм) с каналом в середине. Жидкий газ заполняет поры и не выливается при самых больших наклонах. Пробирка с нуждающимся в охлаждении препаратом вставляется в канал цилиндра. Поскольку поры занимают около 85% объема тела цилиндра (без канала для колбы), полезный объем сосуда Дьюара почти не теряется.

Как известно, многие материалы (от стали до резины) при сверхнизких температурах становятся хрупкими. Этот же недостаток характеризует и многие пластмассы и синтетические пленки. А вот новая полиамидная пленка «каптон», используемая фирмой «Гамбро» (ФРГ), сохраняет эластичность при температуре 77К. Из этой пленки изготавливаются мешочки для хранения донорской крови. Мешочки стерилизуют нагреванием до 200°С, заполняют донорской кровью и опускают в жидкий азот, где кровь может храниться до пяти лет. Перепад температур в 200°С никак не влияет на пленку «каптон».

Недавно ученые из Института физиологии растений им. К. А. Тимирязева установили, что ростки картофеля оживают после их быстрого охлаждения почти до абсолютного нуля и последующего согревания при определенном режиме. Специалисты надеются, что работа советских исследователей может стать основой для организации «банка картофельных генов». Эта задача особенно актуальна в связи с созданием специальных научных центров для поддержания и пополнения мировой коллекции картофеля. (Многие сорта картофеля уже безвозвратно потеряны человечеством, ряд сортов сейчас находится на грани исчезновения.)

Усилия физиков давно уже были направлены на поиски «высокотемпературных» сверхпроводников. И похоже, что они, наконец увенчались первым успехом. Исследователи из Огайского научного центра (США) обнаружили в кристалле борида титана сверхпроводимость при комнатной температуре (правда, при очень высоком давлении — около 20 млн. гПа). Эксперименты продолжаются.

В течение длительного времени специалистам не удавалось запечатлеть на фотопленке с помощью электронного микроскопа «цепочку» дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) — носительницу генетической информации в живом организме. А это было необходимо для развития многих перспективных областей науки — генной инженерии, биотехнологии и др. Помехой была уязвимость

ДНК, которая разрушалась, прежде чем ученые успевали нажать спусковое устройство фотоаппаратуры.

Задача была успешно решена с помощью сверхнизких температур. Охладив исследуемую клетку до 10К и значительно снизив тем самым ее чувствительность к внешним разрушительным воздействиям, ученые из университетской лаборатории в японском городе Киото впервые в мире получили «фотопортрет» ДНК.

Французские изобретатели создали принципиально новый тип автомобильного двигателя. Источником энергии в нем служит испаряющийся жидкий азот. В сообщении подчеркивается полная безвредность нового двигателя для окружающей среды. Подробности изобретения, физико-технические характеристики этого «криогенного мотора» пока держатся в строгом секрете.

Одна из первых операций при ремонте технических устройств — очистка металлических поверхностей от старой краски. До сих пор для этого использовались в основном растворители, «пескоструйки», абразивные инструменты, вибрация растворов, куда погружалась деталь, и т. д. Все эти операции не слишком производительны, а многие к тому же создают немало сложностей для охраны труда.

Новое средство, разработанное в Московском институте инженеров сельхозпроизводства им. В. Горячкина, лишено указанных недостатков. Изобретенный его сотрудниками пневмостолет «обстреливает» очищаемую поверхность гранулами двуокиси кислорода. И хотя их температура лишь немного ниже 200К (т. е. ее нельзя отнести к области сверхнизких, криогенных температур), гранулы «сухого льда» при соприкосновении с деталью сильно и резко охлаждают металл. В результате металл дает очень быструю усадку, покрытие мгновенно растрескивается, отделяется от очищаемой поверхности и начинает осыпаться.

В тбилисском ВНИИ охраны труда создана теплоизолирующая, пыле- и газонепроницаемая ткань для защитных костюмов. В таком костюме рабочий-ремонтник может работать в широком диапазоне температур — от 200-градусной «жары» до 60К. Костюмы могут снабжаться либо системой автономного жизнеобеспечения, либо шлангами для подачи воздуха. Но и это еще не все. Костюм-скафандр выдерживает температуру и выше 200°С, а именно до 300°. В этом случае используется система его охлаждения жидким воздухом.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ХОЛОД

Микроминиатюризация в области электронно-вычислительной техники — важнейшее направление научно-технического прогресса.

На основе полупроводниковых интегральных схем можно было бы создать мощную ЭВМ размером всего со школьный ранец, если бы был предложен эффективный способ отвода тепла от такого устройства. Но это оказалось непосильной для современной техники задачей: устройство должно выделять до киловатта энергии каждую секунду. Решение было найдено с помощью криогеники в сочетании с отказом от полупроводников.

Четверть века назад, а точнее, в 1962 году, английский ученый Джозефсон (в то время он был еще студентом) теоретически предсказал эффект, названный позднее его именем. На основе эффекта Джозефсона было сконструировано электронное устройство, так называемый «джозефсоновский переход». Оно представляет собой два сверхпроводящих электрода, разделенных тончайшим (от 10 до 50 Å) слоем диэлектрика. Диэлектрик даже при сверхнизких температурах электрический ток не пропускает. В данном же случае благодаря сверхпроводящему состоянию электродов и в зависимости от приложенных к переходу электрических и магнитных полей электрический ток через изолятор проходит. Причем при температуре 4,2К такой прибор выделяет в 10 000 раз меньше тепла, чем обычный транзистор. Иными словами, ЭВМ той же мощности, что и упомянутая выше, но построенная не на полупроводниках, а на сверхпроводящих элементах, выделяла бы всего 0,1 Вт в секунду! А каждый «джозефсоновский переход» может работать и как детектор, и как усилитель, и как ячейка памяти, и как логический элемент. Наиболее стабильны в работе «джозефсоновские переходы» с электродами из ниобия. По мнению специалистов, производство элементов ЭВМ на основе «джозефсоновских переходов» начнется уже в ближайшие годы.

Вообще же устройства сверхпроводящей электроники уже используются на практике. Так, на их основе созданы сверхчувствительные измерители магнитных потоков и полей, успешно применяемые в медицине (магнитокардиография и магнитоэнцефалография).

Большое внимание наука уделяет сейчас разработке способов получения сверхчистых металлов, анализа их чистоты и изучения их свойств. А надо сказать, что свойства эти поистине удивительные. Например, титан, висмут, вольфрам, хром, молибден, тантал, цирконий долго считались хрупкими. В чистом же виде они оказались пластичными и прочными. И чем выше чистота полученных образцов, тем больше вероятность обнаружения «маскируемых» примесями подлинных свойств металлов.

В лабораториях сравнительно недавно созданного Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов получены монокристаллы многих сверхчистых металлов — меди и серебра, никеля и кобальта, висмута и свинца, индия, сурьмы, самария. Их проба чистоты чрезвычайно высока — до 99,999999 процента! Такая почти идеальная чистота удовлетворяет требованиям микроэлектроники, где металлы находят все более широкое применение.

Жесткие требования микроэлектроники к чистоте используемых металлических материалов связаны с тем, что сверхчистый металл ведет себя почти как сверхпроводник, помехи электронам проводимости создают «чужие» атомы. А это значит, что при отсутствии таких помех, т. е. при работе со сверхчистыми металлами, не возникает (или, точнее, значительно слабее проявляется) проблема отвода тепла. Кроме того, что очень важно для электронно-вычислительной техники, непрерывно циркулирующий поток информации в виде заряда, волны и пр. в схеме, выполненной из сверхчистых металлов, не встретит препятствий, а это предохранит устройство от сбоев и ошибок.

Получение сверхчистых металлов — тема особая, и мы не будем здесь ее касаться. Скажем только, что сохранить вещество в чистом виде не менее сложно, чем получить. И здесь на помощь опять-таки приходит криогенная техника: один из эффективных способов сохранения чистоты металлических материалов — содержание их в условиях сверхнизких температур (в жидком азоте, а еще лучше — в жидком гелии).

В Советском Союзе разработан метод определения чистоты сверхчистых металлов (при содержании примесей менее 10^{-4} процентов), основанный на использова-

нии электромагнитных волн особого типа — геликонов. Эти волны затухают в ряде металлов пропорционально концентрации примесей. Любопытно, что геликоны есть не что иное, как затухание электромагнитных волн, испускаемых плазмой заряженных частиц, что наблюдается лишь в вакууме. Иными словами, сверхчистые металлы проявляют свойства вакуума. Такое же сходство свойств с вакуумом сверхчистые металлы проявили при исследовании «пробега» в них свободных электронов. В сверхчистых образцах индия, например, охлажденных до температур ниже температуры кипения гелия, электроны проходили 8—10 мм — как в вакууме! Более того, была доказана возможность с помощью магнитного поля фокусировать и управлять траекториями электронов проводимости внутри образца сверхчистого металла. Важно отметить, что в сверхчистых металлах плотность потока электронов проводимости составляет 10^{22} электронов в 1 см^3 , т. е. почти как в вакууме и в сотни тысяч раз больше, чем в полупроводниках.

Отсюда был сделан естественный вывод: использование сверхчистых металлов в конструкциях ЭВМ резко повысило бы эффективность вычислительных и управляющих систем. По мнению директора Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов, члена-корреспондента АН СССР Ч. В. Копецкого, развитие науки и техники в этом направлении может привести к появлению новой отрасли — металлической электроники, или металлотроники. Основным элементом электронных систем, по его мнению, могут стать «триады» из двух сверхчистых металлических монокристаллов, соединенных (или разделенных) микромостиком («длиной» до 100 мкм), изготовленным также из металлического монокристалла особой чистоты. Через такой микромостик при близких к абсолютному нулю температурах можно пропускать электроток огромной плотности — 10^9 — 10^{10} А/см². И мостик при этом даже не нагревается. Это поистине парадоксальное свойство сверхчистых металлов, ведь самый тугоплавкий металл обычной технической чистоты испаряется при плотности тока 10^5 на квадратный сантиметр.

Одним словом, металлотроника в содружестве с криогенной техникой обещают в обозримом будущем новое ускорение научно-технического прогресса.

КРИОГЕННАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Криогенные электрические машины (КЭМ) обычно классифицируют так же, как и традиционные. Например, их можно разделить на машины переменного и постоянного тока. Первые могут быть синхронными и асинхронными, вторые — разноименно-полюсные и одноименно-полюсные. Разумеется, КЭМ имеют и свои «криогенные» особенности и характеризуются как способом охлаждения, так и возможностями, которые раскрываются при применении сверхнизких температур.

У некоторых сверхчистых металлов в диапазоне 20,4—77К резко уменьшается электрическое сопротивление. В отличие от сверхпроводников такие материалы называют криопроводниками. Отсюда следует возможный способ классификации КЭМ: с криопроводниковой обмоткой и со сверхпроводниковой обмоткой. Наиболее перспективными признаны сверхпроводниковые КЭМ: в их обмотках малы внутренние потери и не столь уж велик расход хладагента.

Самая главная и конструктивно сложная часть любой КЭМ — криостат, в котором функционирует сверхпроводящая обмотка машины. По этому признаку можно делить КЭМ на два типа: с неподвижным и с вращающимся криостатом. К машинам с неподвижным криостатом относятся разнообразные КЭМ постоянного и переменного тока. Вращающиеся криостаты устанавливают главным образом на криотурбогенераторы.

При неподвижном криостате сверхпроводниковая обмотка возбуждения помещается в гелиевой ванне, где закрепляется при помощи специального малотеплопроводящего «теплового замка». Криостатирование осуществляется при помощи двух криогенных жидкостей — гелия и азота. Для многих подобных КЭМ конструкция якоря аналогична традиционной. В некоторых случаях для повышения ЭДС разделяют якоря на последовательно включенные элементы.

Проблема создания КЭМ с вращающимися криостатами более сложна: здесь криостат является силовым звеном, передающим вращающий момент от приводного двигателя к сверхпроводниковой обмотке. В силу конструктивных особенностей машины с вращающимися криостатами «не приемлют» эффективную в большинстве случаев схему криостатирования двумя сверххолодными жидкостями.

«Сердце» каждой КЭМ, естественно, сверхпроводниковая обмотка возбуждения из так называемых сверхпроводников второго рода, позволяет получить высокие предельные значения индукции магнитного поля и плотности тока. Создание таких проводников — одно из крупнейших достижений современной технической физики.

Однако, даже располагая необходимым материалом, сделать

хорошую обмотку возбуждения не так-то просто. Технические свойства сверхпроводников характеризуются тремя критическими параметрами: температурой перехода в сверхпроводящее состояние, критическим значением индукции магнитного поля и критическим током. При переходе через границы, определяемые этими параметрами, сверхпроводимость исчезает. Между тем оказалось, что при работе обмотки возникают электромагнитные силы, стремящиеся ее деформировать. Это, в свою очередь, существенно снижает критический ток и, следовательно, «мешает» сверхпроводимости. Поэтому конструкция обмотки должна гарантировать обязательное сохранение нужной формы и не допускать деформации под действием внутренних сил. Сейчас наиболее распространены две формы катушек: плоская и седлообразная. Намотка плоских катушек проще, так как для предотвращения деформаций их боковую поверхность удобно бандажировать.

Цилиндрическая обмотка из катушек седлообразной формы позволяет с наибольшей эффективностью использовать магнитный поток и получить более высокие значения магнитной индукции. Однако технология изготовления таких катушек сложна.

При проектировании КЭМ подобные «хитрости» и особенности встречаются практически на каждом шагу. Как и в каждом принципиально новом деле, от идеи до технической реализации в «железе» — немалый и непростой путь. Особыми качествами должны обладать и якоря машин, и скользящие контакты, и используемые в криогенном электромашиностроении конструкционные стали. Для изготовления роторов криотурбогенераторов, например, необходима сталь с высокими механическими свойствами при работе в температурном диапазоне 4,2—300К, технологичная, немагнитная в сильных магнитных полях при криогенных температурах, с низкой теплопроводностью и др. Понятно, что для получения таких чудо-материалов требуются весьма высокие уровни развития техники и культуры производства.

Надо сказать, что пока далеко не все трудности преодолены. Еще требуется решить множество «тактических и стратегических» проблем. В частности, добиться необходимой надежности КЭМ в условиях эксплуатации. Можно, однако, не сомневаться, что в XXI веке криогенные электрические машины станут явлением столь же обыденным, как традиционные машины сейчас.

К 82 Криогеника. — М.: Знание, 1986. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Техника»; № 7). 11 к.

В брошюре рассматриваются проблемы использования холода криогенных температур в технике. В частности, описываются машины для получения криогенных температур и криопродуктов, производство инертных газов и т. д.

Брошюра рассчитана на слушателей народных университетов, на всех тех, кто интересуется научно-техническим прогрессом.

2101000000

ББК 3

КРИОГЕНИКА

Гл. отраслевой редактор Л. А. ЕРЛЫКИН

Редактор Г. И. ФЛИОРЕНТ

Мл. редактор В. Я. БИРЮКОВА

Обложка художника А. Л. САЛЬНИКОВА

Худож. редактор П. Л. ХРАМЦОВ

Техн. редактор Т. В. ЛУГОВСКАЯ

Корректор Н. Д. МЕЛЕШКИНА

ИБ № 8199

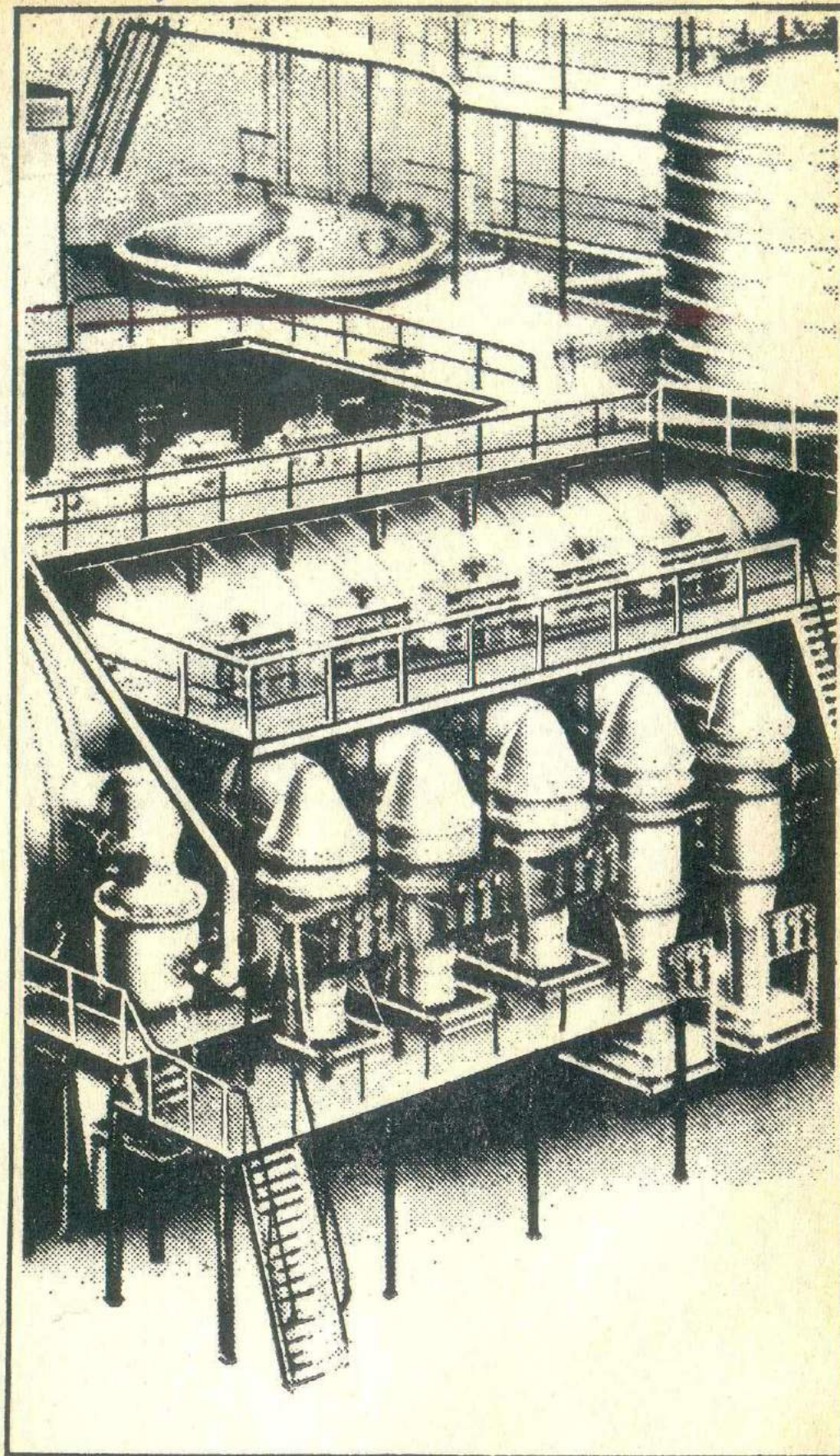
Сдано в набор 19.04.86. Подписано к печати 24.06.86. Т 11057. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,68. Уч.-изд. л. 3,46. Тираж 45 800 экз. Заказ 979. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 864407.

Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

11 коп.

108- 25-96

Индекс 70067



СЕРИЯ
ТЕХНИКА