

Р.В. ГАВРИЛОВ

Специальное конструкторско-
технологическое бюро
по криогенной технике
ФТИНТ НАН Украины

КРИОГЕНИКА ДЛЯ КОСМОСА И ЗЕМЛИ

Main directions of scientific and production activities of the Special design and technological bureau on cryogenic engineering FTINT NAN in the Ukraine have been considered. Special attention was given to cryostats for scientific investigations with helium, hydrogen, nitrogen and other substances in liquid and solid state, as well as to systems of cryostatting of different objects on satellites of the Earth and orbital stations. Cryogenic electrical machines, apparatuses for cryosurgery developed by the workers of the Special Design and technological bureau have been also described.

Тематика СКТБ по криогенной технике ФТИНТ НАН Украины выходит далеко за рамки конструкторско-технологической деятельности. Научные подразделения СКТБ занимаются прикладными исследованиями тех объектов, материалов и процессов, которые затем становятся предметом новых разработок. Есть в составе СКТБ и завод, технологические возможности которого обеспечивают изготовление и испытания опытных образцов и малых серий новых изделий, экспериментального оборудования для низкотемпературных исследований, другой продукции.

Одной из первых разработок СКТБ было создание *серии криостатов* для научных исследований с гелием, водородом, азотом, кислородом, инертными газами и другими веществами в жидком и твердом состоянии; оптических криостатов (с окнами), радиопрозрачных, немагнитных (стеклопластиковых); стационарных, транспортных и переносных сосудов; криостатов, вращающихся с угловыми скоростями до 12 000 об/мин, и криостатов, работающих в невесомости на борту космических аппаратов. Это специальные криостаты для получения сверхнизких температур и для исследования механических свойств материалов, нагружаемых непосредственно в криогенной жидкости, и т.д.

Для создания стеклопластиковых криостатов разработали оригинальную технологию. На ее основе организовали серийный выпуск немагнитных и радиопрозрачных малогабаритных криостатов для медицинской аппаратуры, бортовых геофизических приборов вместимостью от 1 до 15 л жидкого гелия с потерями жидкости не более 0,5 л/сут. Разработаны широкогорлые металлические криостаты, ресурс работы которых от одной заправки жидкого гелия превышает 6 мес. Автономные оптические криостаты с электрическим управлением для различных приемников излучения могут использоваться на борту авиационных и космических носителей. Все эти изделия характеризуются малой массой, небольшими потерями и максимальной адаптированностью к оптимальным условиям размещения и работы охлаждаемого объекта. Кроме того, выпускают лаборатор-

ные, транспортные и стационарные криостаты общего назначения.

Особый класс составляют малогабаритные лабораторные проточные криостаты, имеющие значительные преимущества при низкотемпературных физических исследованиях объектов и процессов с большим тепловыделением, где теплота отводится от исследуемых объектов с помощью теплообменников или методом принудительного обдува струей газа. При этом температуру объекта в интервале 1,5...400 К можно регулировать с высокой скоростью. Важная особенность проточных криостатов — наличие неохлаждаемых оптических окон при гелиевой температуре объекта. Такие криостаты применяют в низкотемпературных оптических, рентгеновских и магнитных исследованиях методами электронной микроскопии, электронного спинового и ядерного магнитного резонанса и т.д.

Эффективность работы криостата зависит в значительной степени от качества теплоизоляции.

Учеными СКТБ были подробно изучены экспериментально и теоретически лучистый, молекулярный и контактный теплопереносы в вакууме. На основе полученных результатов разработаны физические модели и создаются различные виды высокоэффективной *многослойной экранно-вакуумной теплоизоляции*. Создать теплоизоляцию с такими высокими характеристиками можно лишь в том случае, если правильно подобрать материал (не только по оптическим и тепловым свойствам, но и по газовыделению) и специальные геометрические характеристики экранов (оптимальные размеры и расположение рифления и перфораций), способ их крепления и технологию сборки. Все эти непростые задачи решаются во взаимодействии с промышленными производителями изоляционных материалов; в последние годы опыт их решения находит приме-

нение не только в криогенной технике, но и в энергетике Украины.

Экранно-вакуумная теплоизоляция представляет собой многослойный пакет тонких отражающих экранов из алюминизированной лавсановой пленки толщиной 3...12 мкм, разделенных тонкими слоями (толщина 30...100 мкм) низкотеплопроводных волокнистых бумагоподобных материалов. Такая изоляция оптимальна в криогенной и космической технике, где необходимо сочетание сверхмалой теплопроводности [0,35...1 мВт/(см·К)] с малой плотностью (до 40 кг/м³).

В СКТБ созданы не только новые виды экранно-вакуумной теплоизоляции, но и технология, а также аппаратура для ее исследований и для испытаний опытных и промышленных образцов криостатов. Так, была разработана оригинальная аппаратура для определения количества и состава продуктов газовыделения, газопроницаемости, а также для исследования пакетов изоляции. Значительный прогресс обеспечили и новые композиционные прокладочные материалы на основе целлюлозных, синтетических базальтовых волокон. Высокая прочность этих материалов при очень малой толщине (30...40 мкм) и небольшой массе (до 10 г на 1 м²) достигается в результате их соединения целлюлозными волокнами. Использование высокопроизводительной технологии получения прокладок позволило ввести в их состав также волокна углеродного адсорбента, что обеспечивает поддержание вакуума в слоях изоляции в течение 5 и более лет.

Эффективная работа экранно-вакуумной теплоизоляции возможна лишь при соблюдении правильной, также созданной в СКТБ технологии монтажа пакетов, и при условии, что устранены заряды статического электричества.

Предложена и однокомпонентная экранно-вакуумная теплоизоляция без прокладочного материала, состоящая

димпированных экранов, т.е. экранов, имеющих периодическую систему «выдавок», которые исключают тепловой контакт экранов друг с другом. Особенно перспективно применение многокомпонентной экранно-вакуумной теплоизоляции в криостатах для физических приборов. В этом случае ее преимущества состоят в отсутствии образования пылевидных частиц, в высокой газопроницаемости и низком тепловыделении, что предотвращает загрязнение криогенной оптики. Разработанная в СКТБ теплоизоляция различных видов апробирована и используется во многих промышленных изделиях криогенного назначения. В последние годы ведутся работы по созданию капиллярной высокотемпературной теплоизоляции для трубопроводов 30...100 мм.

Глубокое изучение естественной конвекции в сосудах легло в основу создания баков для длительного хранения и транспортировки криогенных жидкостей с минимальными потерями. Так, разработаны баки для компонентов ракетных топлив и баки для ожиженного природного газа (такие баки для грузовых автомобилей были спроектированы, изготовлены и испытаны в СКТБ). На рис. 1 показаны такой бак и автомобиль, оснащенный системой хранения и подачи ожиженного природного газа (метана), используемого в качестве топлива. Важно подчеркнуть отличие таких автомобилей от автомобилей, использующих сжатый природный газ в тяжелых баллонах. Здесь применен криогенный бак из легкого алюминиевого сплава, давление в котором не превышает $3 \cdot 10^5$ Па (3 кгс/см²). Поэтому при вместимости бака в 190 л вся система в незаправленном состоянии имеет массу всего около 80 кг, а пробег грузовика от одной заправки достигает 350 км. При использовании сжатого природного газа система весит почти в 10 раз больше, соответственно снижается полезная нагрузка автомобиля. Было изготовлено около 100 таких систем с криогенным баком. Опыт их эксплуата-

ции показал, что использование ожиженного природного газа дает существенные экономические и экологические (загрязнение окружающей среды снижается вдвое) преимущества.

Работа систем криостатирования, использующих кипение криогенных жидкостей — процесс, обеспечивающий наиболее интенсивный теплообмен, особенно чувствительна к такому фактору, как ускорение свободного падения, от которого сильно зависит поведение двухфазной парожидкостной системы. Ученые СКТБ подробно исследовали, как кипят гелий, водород, азот и кислород при относительных ускорениях 0,01 и 3000. В первом случае использовали собственную методику и установки для лабораторного моделирования частичной и полной невесомости, во втором — вращающиеся криостаты. Результаты испытаний позволили разработчикам создать эффективные системы охлаждения как для некоторых бортовых устройств, так и сверхпроводниковых обмоток роторов криогенных генераторов.

Сейчас ученые СКТБ продолжают исследование кипения криогенных жидкостей уже непосредственно при микрогравитации на борту Международной космической станции. Конструкция разработанной для этой цели экспериментальной установки интегрирует весь наш предшествующий опыт создания криостатов. Особенности этой конструкции, существенно повышающие качество научных данных и пока еще никем не реализованные в бортовых экспериментах, — это активный контроль действующего микроускорения по величине и направлению путем вращения криостата, видеосъемка процессов непосредственно в жидком гелии.

Для криостатирования на борту космических аппаратов оптимальны системы пассивных источников холода, такие как сублимационные аккумуляторы холода с использованием твердых криоагентов. Ряд таких аккумуляторов холода, созданных в СКТБ, применя-

ли на советских спутниках Земли и орбитальных станциях для охлаждения различного научного оборудования. Эти системы имеют ряд преимуществ перед системами с криогенными жидкостями: более низкий уровень температур, более высокие значения теплоты фазового перехода и объемной плотности вещества, что при одинаковых размерах системы позволяет увеличить ресурс работы (до 1 года). Кроме того, исключается необходимость в решении сложной задачи разделения парожидкостной смеси в условиях микрогравитации, а космический вакуум работает как «бесплатный насос». Наконец, сублимационные аккумуляторы холода не имеют движущихся частей, а потому не нуждаются в приводе и не создают помех работе высокочувствительных бортовых приборов.

Например, один из показанных на рис. 2 аккумуляторов холода на твердом азоте использовали для криостатирования приемника инфракрасного излучения на борту космической станции «Салют-4». Ресурс работы этого аккумулятора 6 мес, масса 35 кг, диапазон рабочих температур 50...55 К. Изделия других типов при массе до 140 кг и ресурсе от 1 до 12 мес обеспечивают холодопроизводительность до 2 Вт.

Для сублимационных аккумуляторов холода всех типов были созданы наземные комплексы контрольно-заправочного и испытательного оборудования.

Для бортовых систем криостатирования с ресурсом более одного года при высоком тепловыделении на объекте и в случае необходимости создания более низких рабочих температур необходимы активные источники холода — рефрижераторы, работающие самостоятельно или вместе с сублимационными аккумуляторами. Для криостатирования на борту космических аппаратов в СКТБ разработаны газовые рефрижераторы различных систем (рефрижераторы Джоуля-Томсона, Стирлинга, пульсационные трубки), использующие различные рабочие вещества — от гелия до смесей углеводородов. Для



Рис. 1. Автомобильные баки для метана



Рис. 2. Аккумуляторы холода



этого потребовались, кроме прочего, углубленные научные исследования свойств рабочих веществ и их смесей в различных пропорциях.

Малогабаритный рефрижератор Стирлинга с линейным электроприводом (рис. 3) холодопроизводительностью 10 Вт при температурах ниже 75 К рассчитан на продолжительную работу в течение 5000 ч. Кроме того, разработаны малогабаритные бортовые рефрижераторы испарения, использующие изотоп гелий-3 для получения температур до 0,3 К.

Сочетание компрессионно-дроссельного газового рефрижератора периодического действия с аккумуляторами холода позволило создать автономную бортовую систему криостатирования с ресурсом до 5 лет, которая дает возможность воспринимать тепловые нагрузки в течение кратковременной интенсивной работы объекта. Такая система (рис. 4) работает по замкнутому циклу в течение 3...5 тыс. ч. Масса системы 250 кг, рабочая температура на охлаждаемом объекте 84...90 К, средняя холодопроизводительность 8...10 Вт. Благодаря выбору эффективной рабочей газовой смеси (азот-углеводороды), а также использованию компрессора с высокой надежностью и значительным КПД дроссельный рефрижератор на уровне температуры 80...82 К вырабатывает до 40 Вт холода при энергопотреблении 1100 Вт. Высокая надежность компрессора обусловлена применением безмоментного привода, щелевого уплотнения без смазки в паре поршень-цилиндр и комбинированного фильтра-адсорбера. В СКТБ были разработаны научные основы ускоренных испытаний надежности таких систем, позволяющие по результатам кратковременных наземных тестов в специально созданных условиях, отличающихся от штатных, оценить вероятность отказа в течение ресурса из-за таких причин, как меха-

нические усталостные поломки, износ, засорение примесями и т.д.

На основе опыта разработки высокоэффективных бортовых компрессоров, использующих современные технологии, в последние годы в СКТБ создано также мощное компрессорное оборудование для газодобывающей и газоперерабатывающей промышленности Украины.

Одно из важных направлений деятельности СКТБ — исследования в области криогенно-вакуумного материаловедения, потребовавшие создания развитой экспериментально-испытательной базы.

С одной стороны, появилась необходимость в изучении физических процессов в материалах непосредственно в вакууме или в криогенной жидкости, для чего понадобились установки, дающие возможность в этих условиях подвергать образцы механическим нагрузкам, измерять их деформацию, износ или коэффициент трения, оценивать изменения во внутренней структуре материалов.

С другой стороны, необходимо было испытывать в условиях, максимально приближенных к космическим, не только материалы, но и целые узлы, а также агрегаты (вплоть до небольших космических аппаратов). Для этого в СКТБ с максимальной точностью воспроизвели весь набор условий их будущей работы в наземных вакуумных камерах-имитаторах. Так как для имитации факторов космического пространства нужен вакуум не просто высокий, а «черный» (т.е. поглощающий все испаряющиеся с поверхностей молекулы) и «холодный», обязательными компонентами имитаторов стали панели криогенных конденсационных насосов, использующих жидкие азот, водород и гелий. Конечно, оптимальный выбор их формы и размеров был невозможен без создания методов расчета молекулярных и лучистых потоков в процес-

сах вакуумной откачки.

Доказательство оптимальности этих методов — широкий спектр созданных в СКТБ и работавших на всей территории СССР вакуумных камер рабочими объемами от 50 л до нескольких кубических метров, где помещался целый спутник (вакуум от 10^{-7} до 10^{-12} торр). Криогенные конденсационные насосы были разработаны и для вакуумных камер объемом 60...300 м³. Удалось обеспечить даже высокий «безмасляный» вакуум для испытания оптических материалов.

Помещенные в вакуумные камеры (рис. 5) узлы космических аппаратов или образцы новых материалов подвергаются воздействию факторов космического пространства:

- на них направляют пучки протонов и электронов от специально созданных ускорителей, а также излучение «искусственного Солнца» (роль которого играют мощные лампы);

- их многократно охлаждают до 4 К и вновь нагревают, моделируя происходящие на каждом витке переходы из света в тень, или поворачивают целиком относительно источников факторов космического пространства;

- их растягивают и сжимают, подвергают вибрациям — все, как на активных участках траектории.

Наконец, экспериментальные образцы, узлы и целые аппараты должны еще и функционировать в этих условиях, на них подают управляющие сигналы и энергию, с них снимают измерительную информацию и т.д. Все это надо было ввести в вакуум камеры, не «испортив» его, но в то же время защитить приборы и аппаратуру от факторов космического пространства.

Была поставлена задача не только измерения остаточного давления в камере, но и определения молекулярного состава и парциального давления остаточных газов. Масс-спектрометрические приборы, разработанные в СКТБ

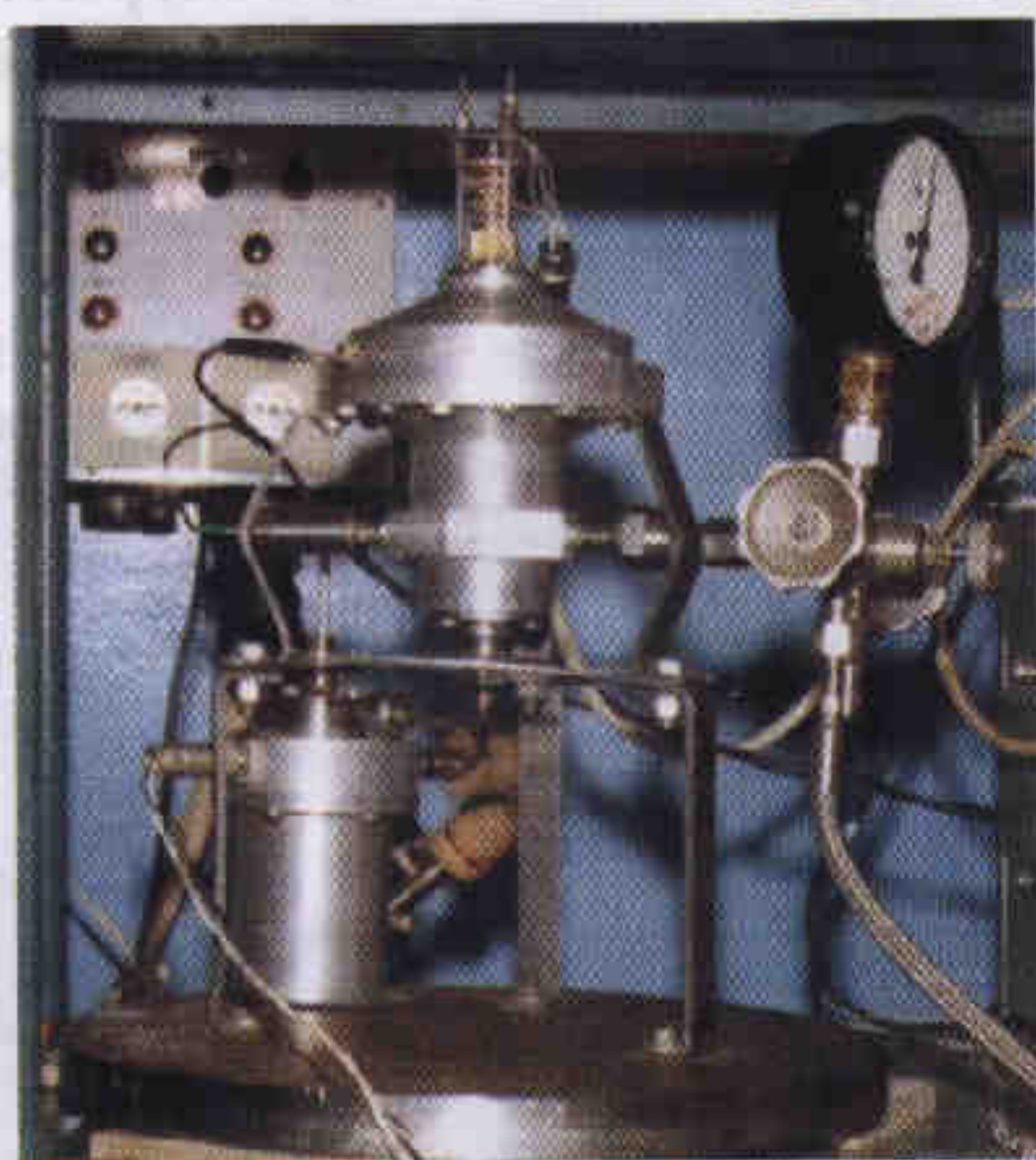


Рис. 3. Рефрижератор Стирлинга

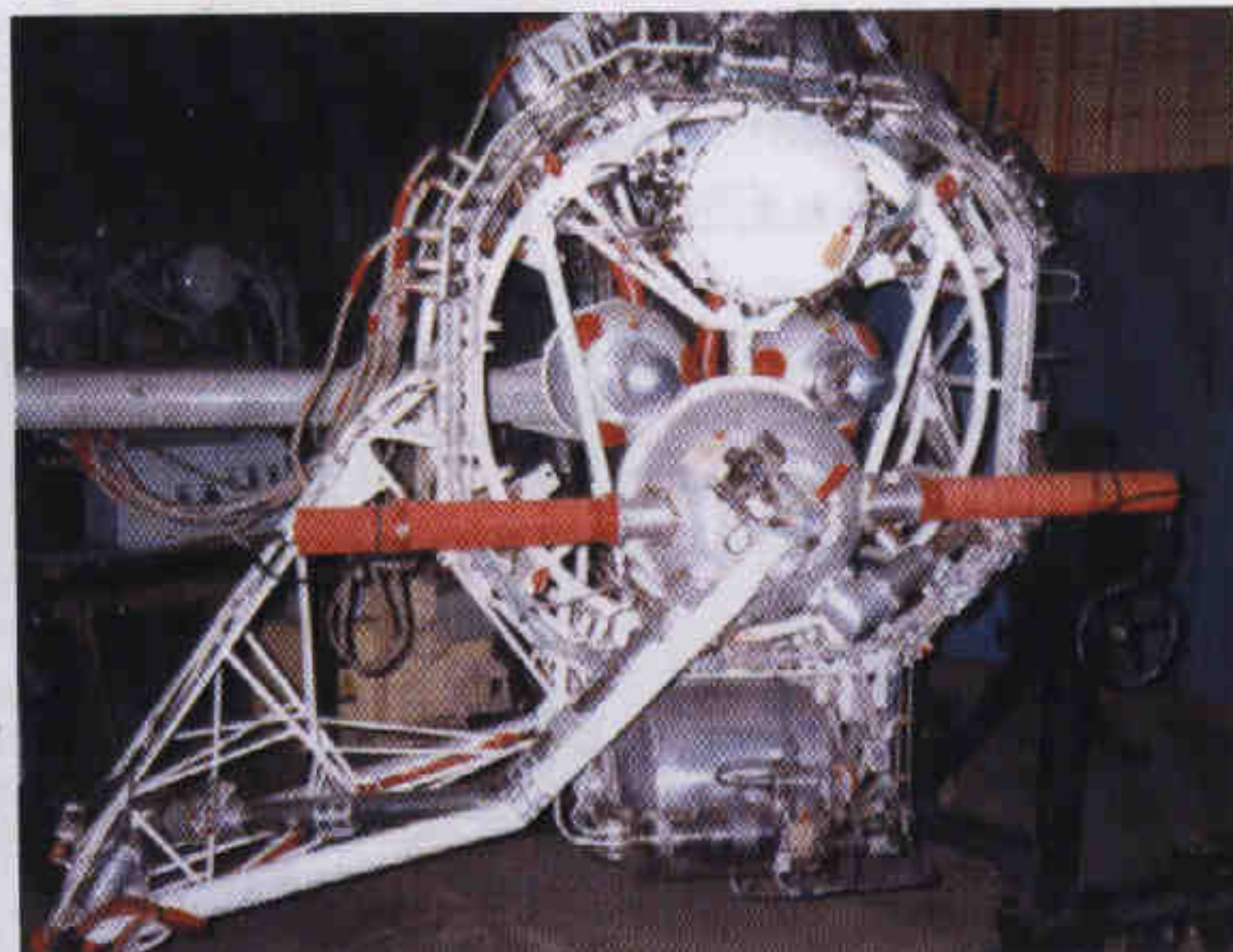


Рис. 4. Опытный образец автономной бортовой системы криостатирования КСГО

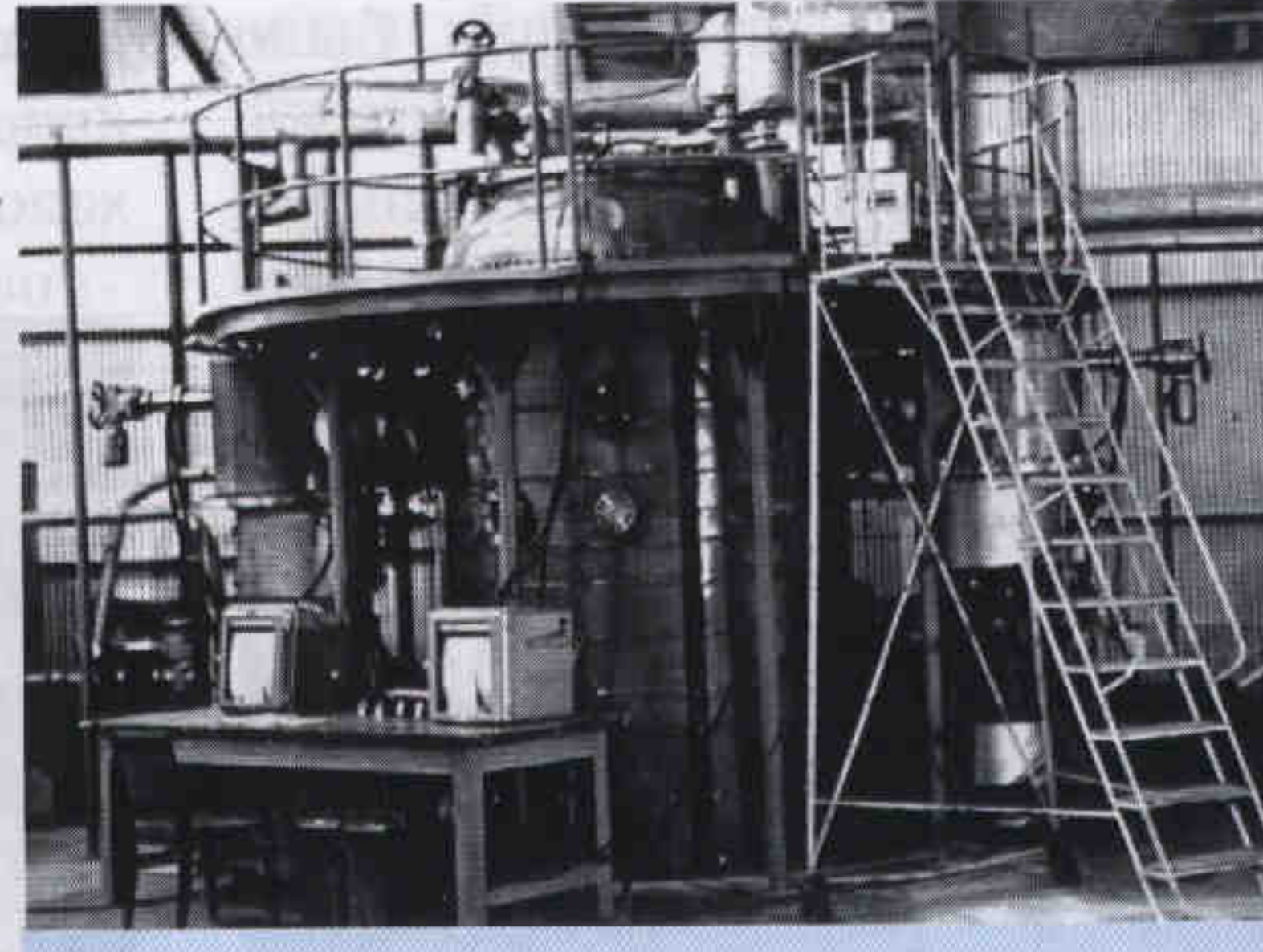


Рис. 5. Вакуумные камеры

успешно решают эту задачу и на орбите, и в имитаторах факторов космического пространства.

Впервые созданный в СКТБ *радиочастотный монополярный масс-спектрометр* стал основой серии приборов, применяемых в космической технике, в физических экспериментах и в народном хозяйстве. Приборы из этой серии устанавливали на высотных ракетах и аэростатах для исследования газового состава верхних слоев атмосферы Земли, на спускаемых аппаратах «Венера» для изучения атмосферы Венеры. Масса бортовых масс-спектрометрических приборов 9...15 кг, потребляемая мощность 18...28 Вт. Все эти приборы оснащены азотными и гелиевыми криогенными насосами.

Комбинируя в разных сочетаниях имитируемые в лабораторных условиях факторы космического пространства, можно получить тот или иной их набор, в максимальной степени моделирующий ожидаемые условия работы нового конструкционного или функционального материала, композита, технического устройства или узла космического аппарата.

Один из вариантов *комплексного имитатора факторов космического пространства* показан на рис. 6. Это вакуумная камера, где на образцы можно воздействовать:

- электромагнитным излучением в диапазоне длин волн 5...2500 нм;
- потоками протонов, электронов, ионов гелия, азота, кислорода и других газов с энергией 5...200 кэВ (облученность может превосходить орбитальную на порядок);
- механическими нагрузками и термоциклированием в интервале температур 4...400 К.

Все исследования можно провести в вакууме до 10^{-8} торр всего за 60...90 мин, измеряя при этом деформацию и потерю массы образцов, электрофизические и оптические свойства и т.д. Обо-

рудование массой до 3,7 т легко размещается в любой лаборатории (занимаемая площадь 5×6,5 м²).

Ученым СКТБ, специализирующимся на исследованиях электромагнитных процессов при низких температурах, удалось вместе с теплофизиками и материаловедцами создать прочную научную базу для разработки *уникальных криогенных электрических машин* — двигателей, трансформаторов и генераторов. Среди них, например, сверхпроводниковые униполярные двигатели для морского транспорта; легкий трансформатор с обмотками из высокочистого алюминия, охлаждаемый жидким водородом; магнит для сепарационного обогащения руды и высокочастотные криогенные бортовые генераторы.

Малогабаритный трехфазный криогенный трансформатор охлаждается погружением в жидкий водород. При мощности 140 кВт·А и силе тока во вторичных обмотках до 500 А потери энергии трансформатора массой менее 20 кг, как установлено его испытаниями, не превышает 800 Вт. Все его обмотки изготовлены из алюминиевой ленты толщиной 0,06...0,1 мм и шириной до 100 мм, в результате их масса вместе с электроизоляцией составляет 4,3 кг. Высокочистый алюминий имеет минимальное электросопротивление при температуре жидкого водорода, что позволяет снизить потери. Однако для применения в обмотках трансформатора этого тонкого и легко деформируемого материала потребовалось создание специальной технологии и оборудования для нарезки ленты, намотки катушек с пропиткой эпоксидной смолой и др.

Другой пример сверхпроводниковой магнитной системы, охлаждаемой жидким гелием, — разработанный в СКТБ *дисковый сепаратор* с объемно-градиентным магнитным полем для обогащения слабомагнитных руд и нерудных материалов. Производительность сепаратора 1 т/ч. Максимальная индукция магнитного поля в рабочей зоне не менее 5 Т. Удельное энергопотребление таких систем в 10...12 раз меньше, чем магнитных сепараторов с резистивными обмотками, а масса — в 1,5 раза меньше.

Высокие скорости вращения охлаждаемых роторов криогенных электрических машин создают ряд сложных научных и прикладных проблем, связанных, к примеру:

- с высокими давлениями в охлажда-

ющем криоагенте, вызываемыми центробежными силами и превышающими критическое давление вещества;

- с механической прочностью материалов;
- с передачей во вращающуюся часть и обратно не только энергии, но и криоагентов (жидких гелия и азота) и измерительной информации.

Все эти проблемы были успешно решены при создании для завода «Электросила» ротора опытно-промышленного *сверхпроводникового криотурбогенератора* мощностью 300 МВт, обмотки которого охлаждались жидким гелием.

Сверхпроводниковые электрические генераторы и двигатели с охлаждаемыми жидким гелием обмотками возбуждения (и вращающимися, и неподвижными) были одними из первых, созданных в СССР еще в начале 70-х гг. Постепенно мощность этих машин, которые разрабатывали, строили и испытывали в СКТБ, увеличивалась. Так, мощность криогенных униполярных электродвигателей возросла со 100 до 850 кВт, криогенных турбогенераторов — с 0,2 до 300 МВт. Отличительная черта этих разработок — седлообразная форма бескаркасных компаундированных сверхпроводниковых обмоток возбуждения из ниобий-титанового сплава. Сила тока возбуждения в таких обмотках достигала 1500 А.

Была показана возможность создания криогенных турбогенераторов с очень низкой металлоемкостью (40...50 г/кВт), что крайне важно для транспортных и бортовых электрических машин.

Этот пример, как и многие другие, показывает, что, работая на нужды космической отрасли, специалисты СКТБ никогда не забывали о потребностях Земли. Так, в СКТБ была разработана *азотная технология для хранения, транспортировки и безотходной переработки сельскохозяйственных продуктов*. Эта технология предусматривает создание непрерывной цепи, которая включает стационарные емкости для длительного хранения охлажденных продуктов в специальной газовой среде, камеры и контейнеры для автомобильного, железнодорожного и морского транспорта и, наконец, криогенное оборудование для экстракции, вакуумно-сублимационной сушки, замораживания (рис.7) и последующего криогенного измельчения пищевого сырья и веществ, используемых в фармацевтической промышленности, косметике и парфюмерии.

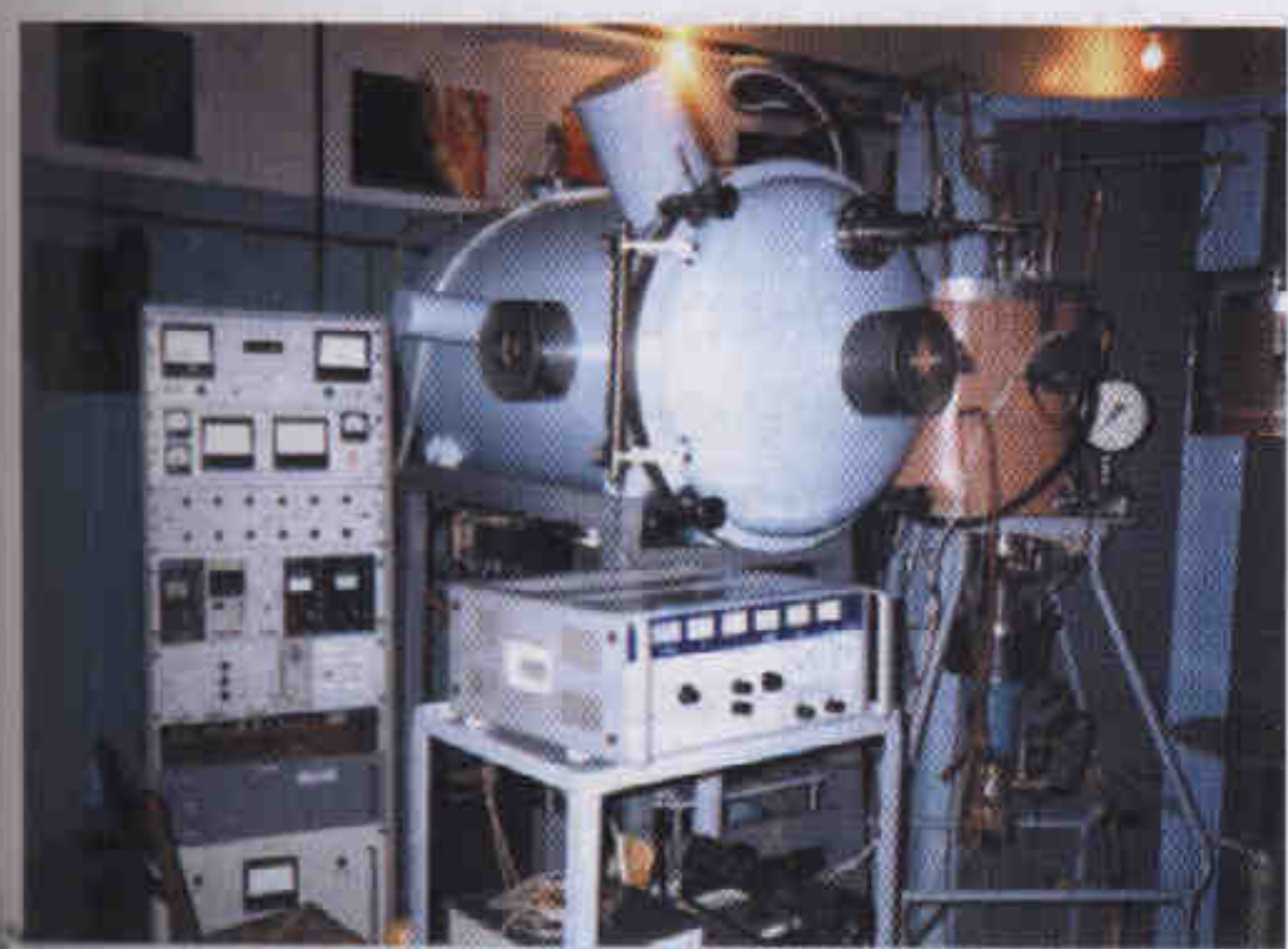


Рис. 6. Комплексный имитатор факторов космического пространства

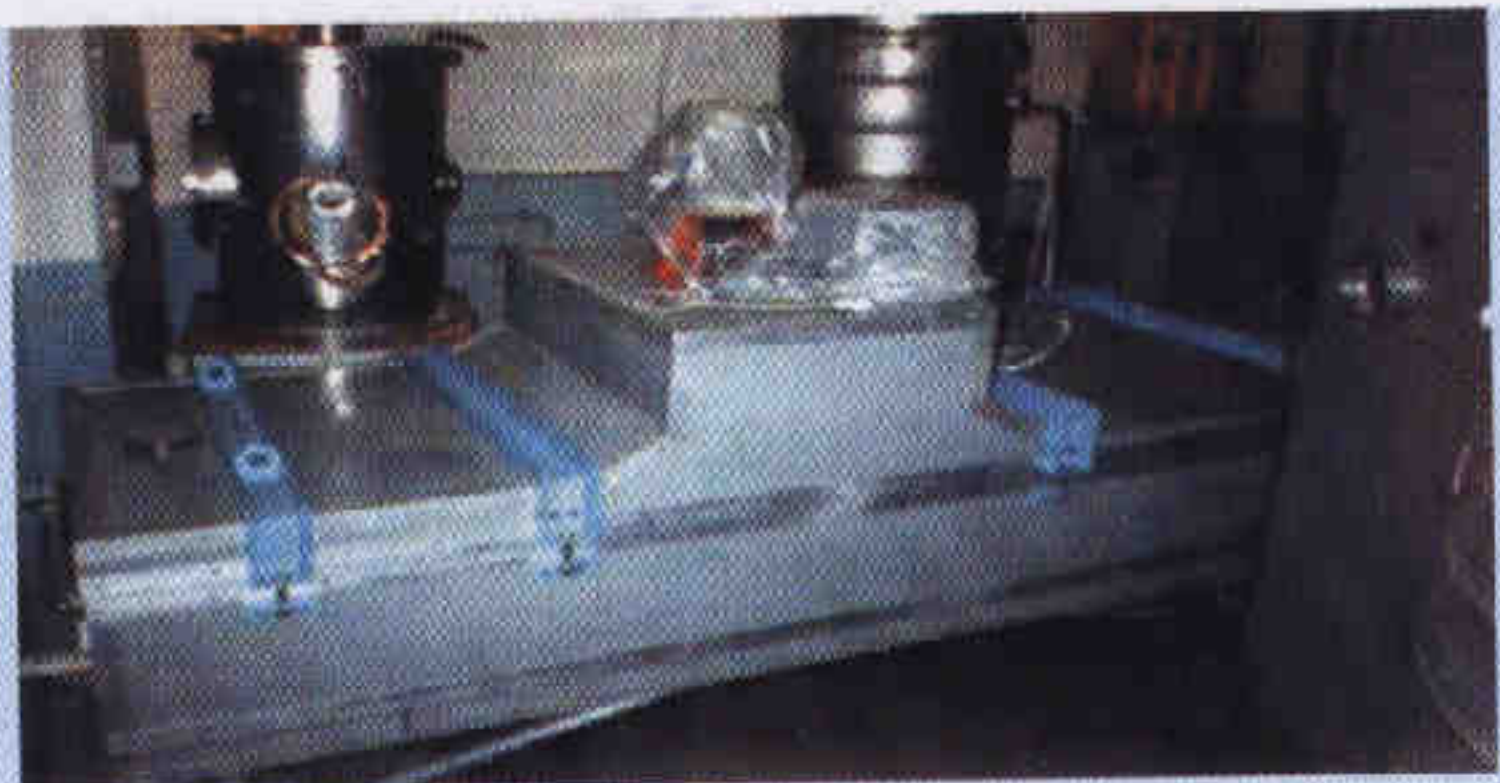
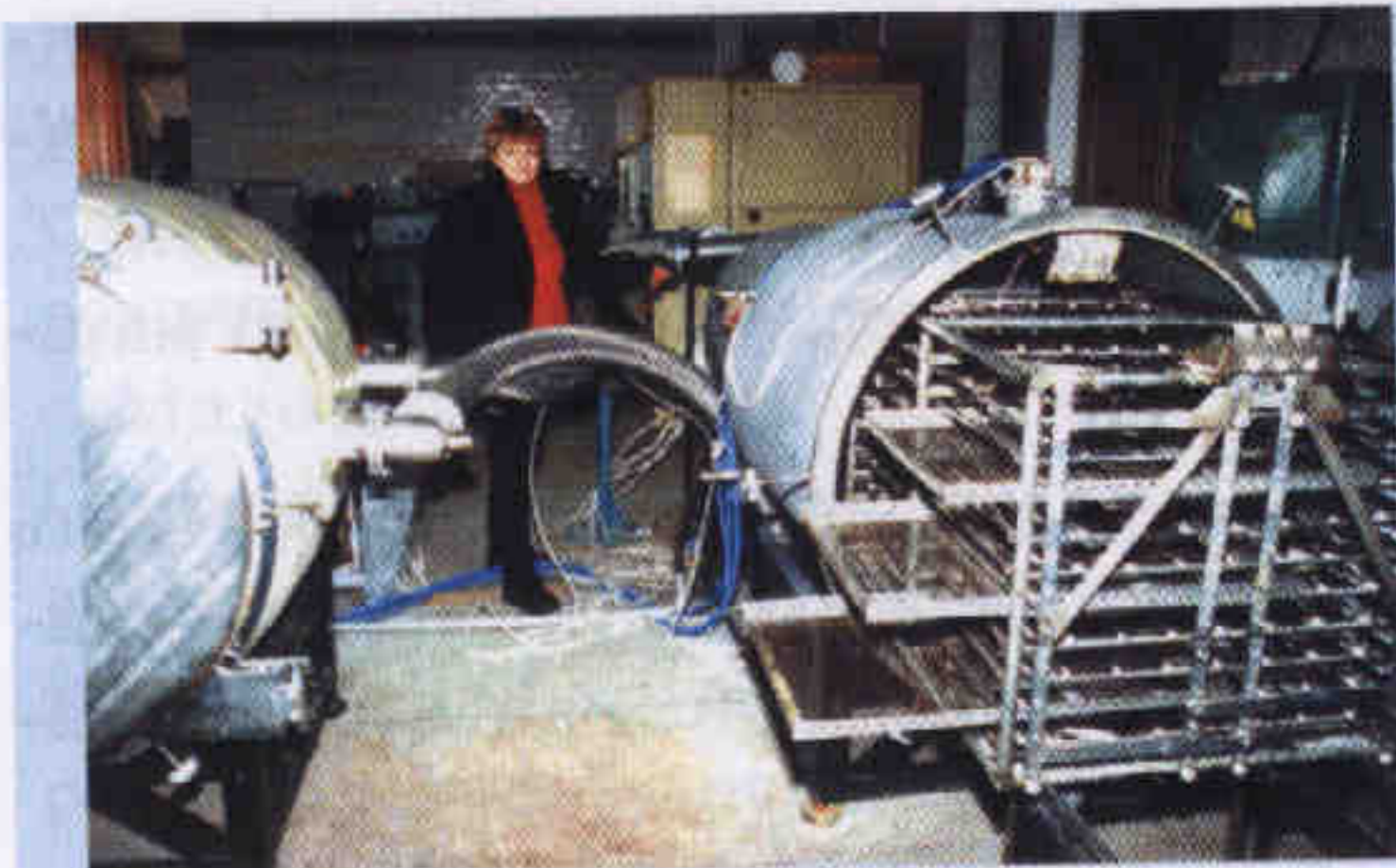


Рис. 7. Сублиматоры и замораживатели

Применение криогенной технологии позволяет не только уменьшить потери сырья, но и сохранить в конечном продукте значительно больше полезных веществ (например, витаминов), чем при обычных методах сушки и измельчения. Получить такие высокие результаты удалось благодаря глубокому пониманию сути физических процессов и изучению свойств реальных объектов.

Умение охлаждать живую ткань с необходимой скоростью и до заданной температуры легло в основу разработок в СКТБ криогенной аппаратуры для работы с живыми системами — для криоконсервации тканей и жидкостей организма, для криохирургии, позволяющей прицельно и бескровно разрушать патологические очаги в организме человека.

Аппараты для криохирургии и криомедицинские инструменты, показанные на рис. 8, просты, эффективны, дешевы в производстве, а для их эксплуатации врачу не требуется помощь инженера или ассистента. Запас криоагента, содержащегося в таких аппаратах, минимально достаточен для обработки одного пациента.

Стоматологические криооросители разработаны для непосредственной криодеструкции пораженных тканей парожидкостной струей азота. Автономный криоороситель КАС-01 состоит из двух легкоразборных узлов и малогабаритного резервуара для жидкого азота (объем 100 мл). Манипуляции с ним можно выполнять одной рукой. Время подготовки к работе не более 5 мин, продолжительность непрерывной работы до 8 мин, масса 0,5 кг.

Автономный криогенный дерматологический аппарата КД-3, использующий жидкий азот, имеет специальную рукоятку, обеспечивающую контролируемое усилие, с которым наконечник действует на кожу, и набор сменных специальных сменных наконечников. На этом же принципе создан ряд автономных криоаппликаторов для деструкции патологических очагов, расположенных глубоко в тканях или в полостях тела, — для лечения заболеваний центральной нервной системы и нейрохирургии, а также в отоларингологии. Эти приборы имеют длинную (до 130 мм) канюлю-хладопровод малого диаметра.

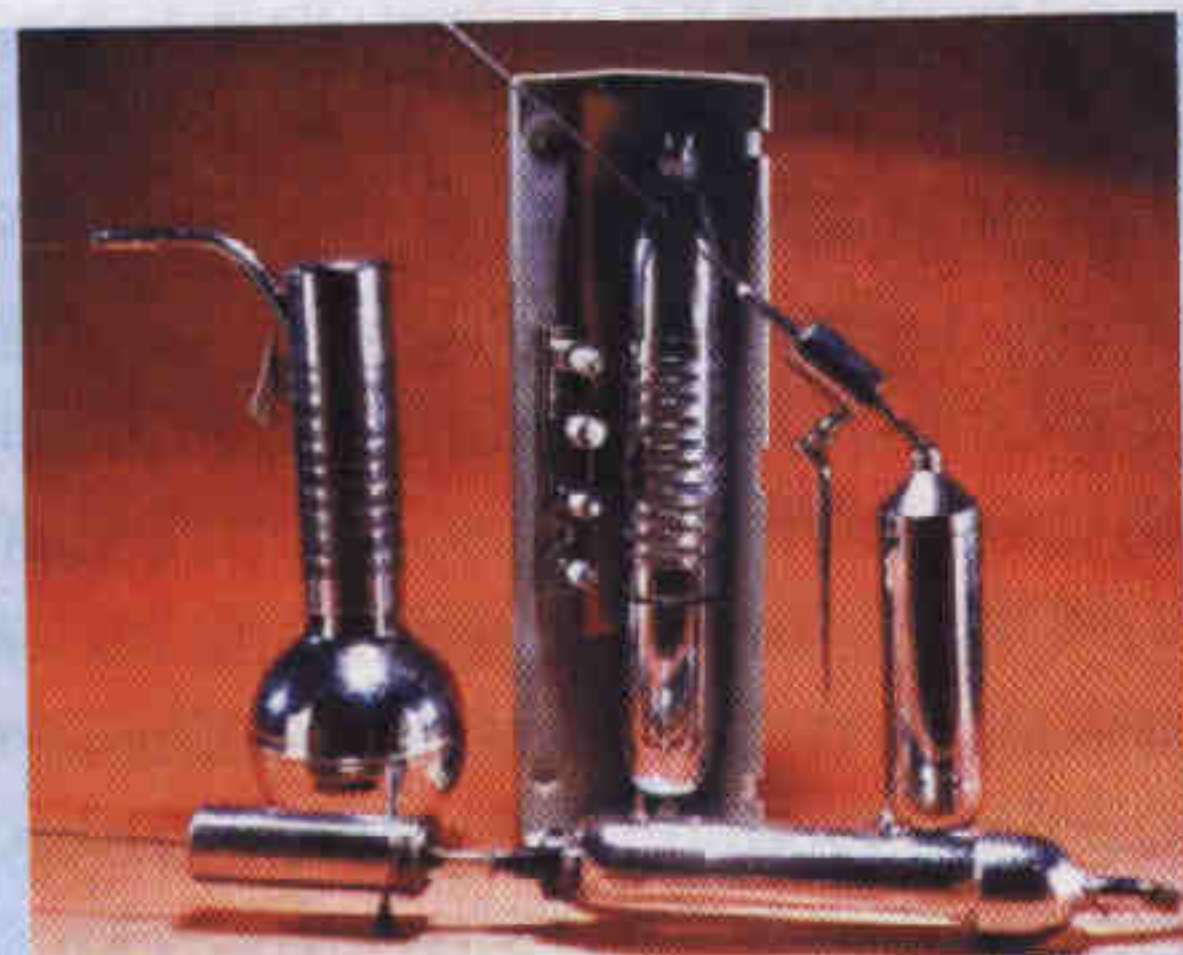


Рис. 8. Криомедицинские аппараты и инструменты

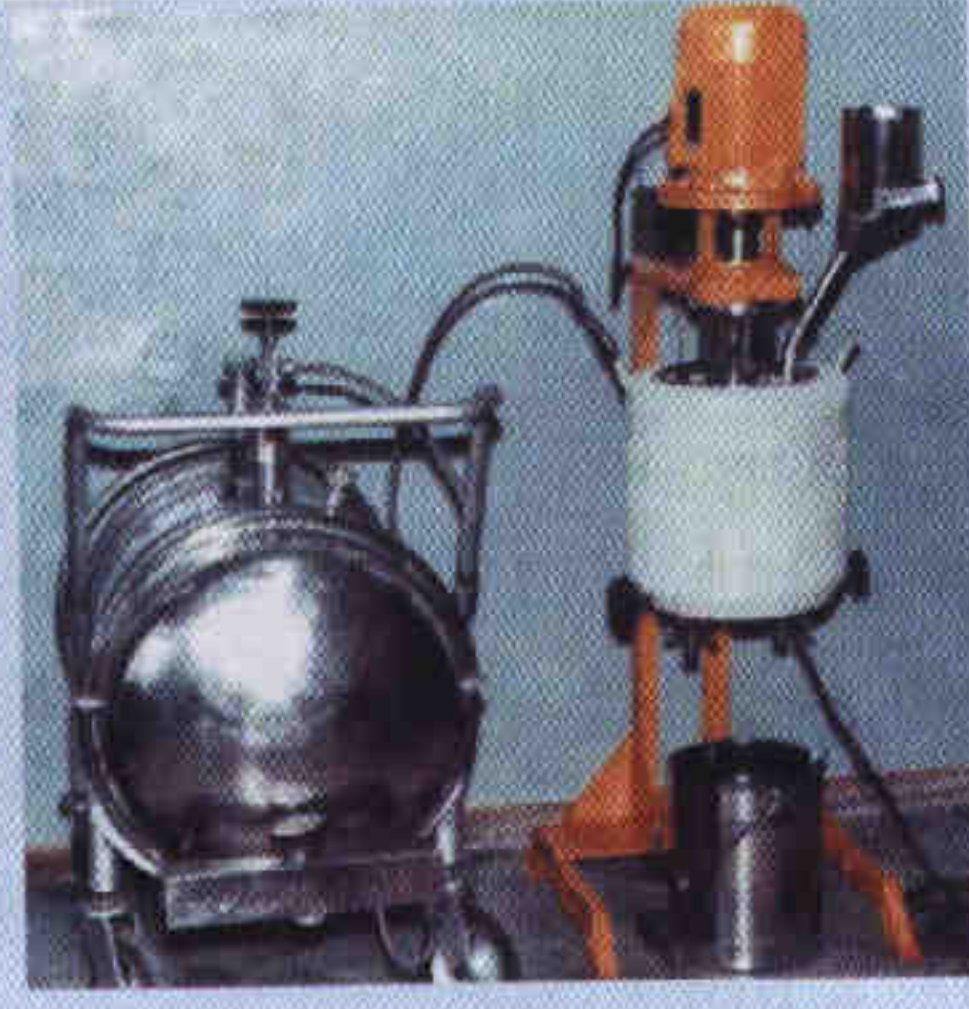
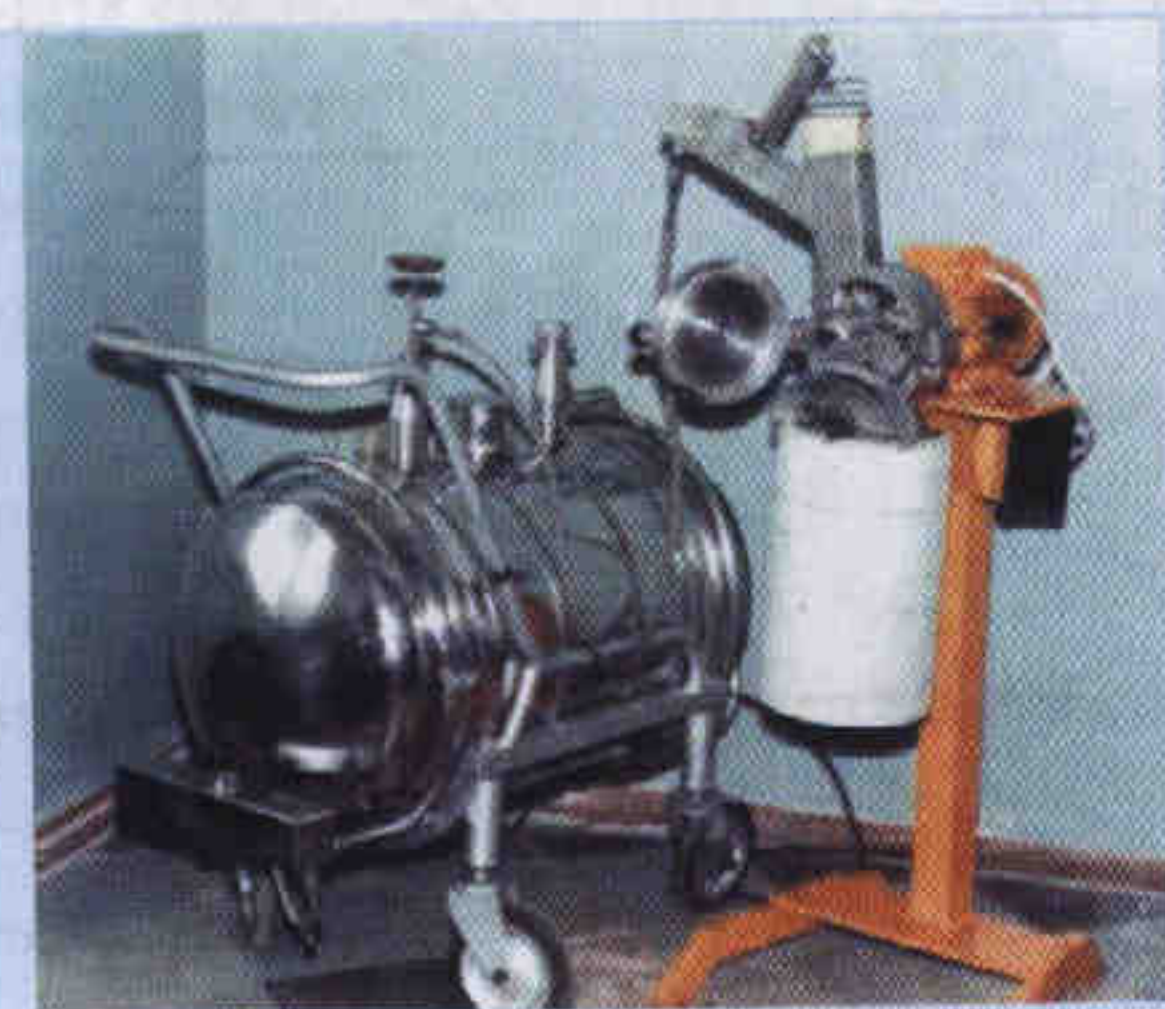
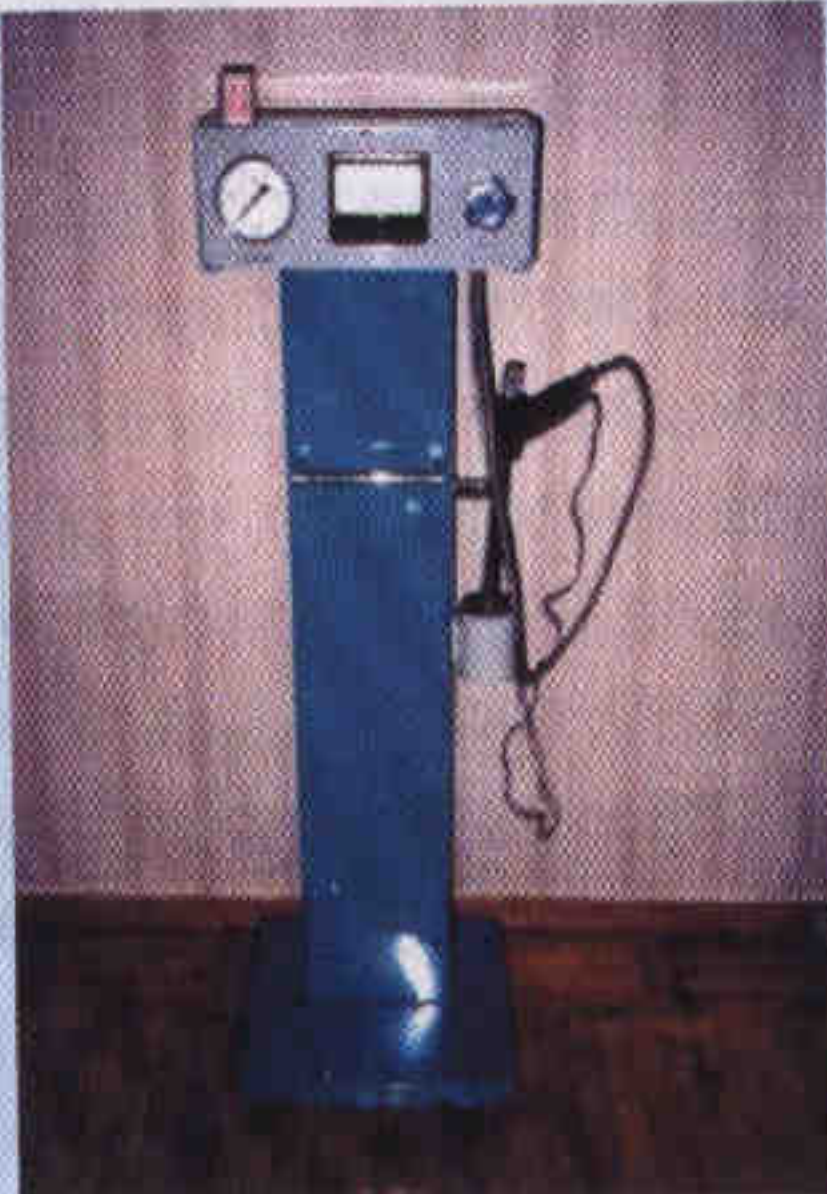


Рис. 9. Криомельницы

Другая серия изделий СКТБ основана на принципе дросселирования в наконечнике криоаппликаторов газообразной медицинской закиси азота или диоксида углерода, содержащихся в сменных баллонах. Здесь общей базой стала передвижная стойка-тележка с пультом управления. Специализация аппаратов обеспечивается выносными (на гибких шлангах) криоаппликаторами различной конструкции для гинекологии и акушерства, офтальмологии и др. Масса таких аппаратов до 40 кг, время непрерывной работы до 12 мин.

Путем криогенного охлаждения можно добиться значительного увеличения хрупкости даже таких материалов, как например, резина, полимеры, которые при обычной температуре не подлежат измельчению. Была создана технология криогенного измельчения изношенных автомобильных покрышек (в том числе с металлическим кордом) различного размера, включая крупногабаритные покрышки от большегрузных карьерных автомобилей. Для оптимизации многостадийного криогенного измельчения были проведены расчеты и экспериментальные исследования процессов захлаживания жидким и газообразным азотом и последующего отепления монолитных систем «резина-металлический корд», резиновых гранулятов различной дисперсности; изучались теплофизические и прочностные свойства этих материалов, уровни энерговыделения при их хрупком разрушении.

Для реализации этой технологии разработано промышленное оборудование производительностью до 12 тыс. т резинового гранулята в год, получаемого из изношенных автомобильных шин диаметром до 1,5 м; в зависимости от назначения средний размер резиновой крошки может достигать 0,1 мм.

Глубокое понимание процессов криогенного измельчения позволило создать устройства для дробления и помола самых различных материалов — от растительного и животного сырья до алмазов, от фармацевтических субстанций до цемента. Работа этих устройств, некоторые из которых показаны на рис. 9, основана на различных физических принципах.

Это шаровые мельницы, дисмембраторы, атриторы. В зависимости от назначения конечного продукта размер частиц даже самых твердых материалов может достигать до 1 мкм.

Очень важно, что многие вещества в дисперсном состоянии приобретают новые свойства, сохранить которые помогает криогенная среда.