

УДК 536.48:629.785

# Криогенная техника в космических исследованиях: разработки ФТИНТ НАН Украины

**С. И. Бондаренко, А. М. Кислов**

Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

*Надійшла до редакції 17.05.95*

Приведены результаты исследований и разработок Физико-технического института низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины в области криогенного оптико-электронного, масс-спектрометрического и сверхпроводникового космического приборостроения, наземной инфракрасной аппаратуры для исследования космических объектов, бортовых систем криостатирования, криогенно-вакуумных имитаторов космического пространства, космического материаловедения и технологий.

Физико-технический институт низких температур (ФТИНТ) Национальной академии наук Украины был создан в 1960 г. по инициативе Б. И. Веркина, ставшего его первым директором и возглавлявшего институт в течение почти 30 лет. Среди широкого круга научных направлений института одно из ведущих мест занимают научно-прикладные исследования и разработки, связанные с использованием криогенной техники в космических исследованиях.

К наиболее важным направлениям института в этой области относится разработка криогенно-вакуумных имитаторов условий космического пространства и бортовых систем криостатирования, сверхпроводниковая электроника, криогенное аэрокосмическое приборостроение, а также космическое материаловедение. В последние 20 лет работы по всем этим направлениям сосредоточены главным образом в Специальном конструкторско-технологическом бюро (СКТБ) по криогенной технике ФТИНТ. Научным руководителем СКТБ и инициатором важнейших разработок был Б. И. Веркин.

В предлагаемой статье приведен обзор основных результатов выполненных работ и кратко рассмотрены задачи планируемых разработок, направленных на применение криогенной техники в космических исследованиях.

## 1. КРИОГЕННАЯ ИНФРАКРАСНАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА

В инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн больше 1 мкм из-за атмосферного поглощения наблюдение естественных и искусственных космических объектов с поверхности Земли можно проводить, как известно, только в небольшой группе окон прозрачности, расположенных почти полностью в спектральном интервале 1...25 мкм. Эмиссия атмосферы ограничивает предельно достижимую нижнюю границу фонового потока и его шума на фотоприемнике, а неоднородность и временные вариации этой эмиссии приводят к дополнительному шуму. Эти ограничения на проведение наблюдений во всем ИК-диапазоне 1...1000 мкм практически полностью снимаются, если телескоп вынесен за пределы атмосферы и установлен на космическом аппарате (КА), у которого характеристики собственной внешней атмосферы удовлетворяют необходимым требованиям.

Для обеспечения минимального уровня собственного шума фотоприемника его охлаждают до температур 80...1 К, а для минимизации шума инструментального фонового потока необходимо охлаждать оптику телескопа и «обрамляющие» ее и

фотоприемник элементы конструкции. Помимо этого оптическая система и конструкция телескопа должны обеспечивать высокую степень подавления фонового излучения от внешних внеполевых источников.

В космических астрономических ИК-телескопах до низких температур охлаждается вся оптическая система (оптика фокальных приборов, объектив, светозащитные бланды и экраны), так что чувствительность фотоприемников ограничивается фоном естественных источников излучения (зодиакальная эмиссия, межзвездная пыль и др.). В наземных астрономических телескопах и космических (самолетных) телескопах для дистанционного зондирования Земли охлаждается фотоприемное устройство, полевая и согласующая оптика фокальных приборов. Рабочая температура этих элементов выбирается так, чтобы фотоприемник работал в режиме ограничения инструментальным фоном (теплый телескоп) и фоном от внешних источников излучения (атмосфера, Земля и др.).

В ФТИНТ в течение примерно 15 лет проводятся разработки наземной, самолетной и космической ИК-аппаратуры для астрономических наблюдений, обнаружения и контроля космических аппаратов, дистанционного зондирования поверхности Земли.

1.1. При разработке космических ИК-телескопов с охлаждаемой оптикой выполнен широкий комплекс теоретических, экспериментальных и конструкторских работ, создан ряд стендов и установок для исследования и испытания отдельных элементов и подсистем криогенных телескопов.

Теоретические исследования были направлены на разработку принципов построения, математических моделей и методик расчета криогенного ИК-телескопа и его подсистем, условий функционирования на орбите, на решение задач планирования космического эксперимента. Разработаны методики и компьютерные программы для решения задач анализа и синтеза оптических систем, для математического моделирования и энергетического расчета оптико-электронного тракта телескопа. Созданы методика и программы для расчета фоновой облученности фотоприемников потоками собственного излучения от элементов оптики и конструкции телескопа и рассеянным излучением от внешних внеполевых источников. В результате этих расчетов определяются степень помехозащищенности плоскости изображения от внутренних и внешних внеполевых источников, допустимые температуры и градиенты температур оптики и элементов конструкции телескопа, допустимые углы линии визирования относительно направлений на Солнце, Землю, Луну и т. п.

Разработаны методика и пакет программ для теплового проектирования космического криогенного ИК-телескопа (Басенко и др., 1990). Пакет программ позволяет проводить расчет орбитального движения КА по заданным начальным параметрам орбиты, расчеты нестационарных тепловых нагрузок элементов телескопа от внешних источников излучения (Земля, Солнце), нестационарных тепловых режимов отдельных элементов и узлов телескопа (Кислов, Плетнев, 1990), криогенной системы и всего телескопа (Плетнев и др., 1988; Pletnyov et. al., 1990).

Для анализа возможностей наблюдения заданных объектов и участков неба разработана методика и программа вычисления функции наблюдаемости этих объектов с учетом допустимого уровня помехового облучения телескопа от внеполевых источников (Солнце, Земля, Луна и планеты). Функция наблюдаемости определяется временем, в течение которого объект находится вне зон с недопустимым уровнем воздействия источников помех, отнесенными к длительности космического эксперимента.

Экспериментальные исследования были направлены прежде всего на изучение свойств различных материалов для изготовления криогенной оптики и элементов конструкции телескопа (Лаврентьев, 1991). В интервале температур 300—30 К исследовались механические и теплофизические свойства, их однородность и изотропность, размерная и структурная стабильность при термоциклировании бериллия, алюминиевых сплавов, карбида кремния, кремния, ситалла и др. Среди изученных материалов ситалл СО-115М имеет наилучшие показатели по размерной стабильности и изотропности физико-механических свойств, хотя у него самое низкое значение коэффициента Максутова.

Разработаны и исследованы криостойчивые интерференционные многослойные покрытия и ИК-фильтры для диапазона 2—25 мкм со стабильными оптическими характеристиками в интервале температур 300—8 К (Беляева, Сиренко, 1991). Экспериментально исследованы схемы и технология изготовления эффективной и бездеформационной системы теплоотводящих контактов хладопровод — зеркало, в частности, для зеркал из ситалла и кремния (Беляева и др., 1992; Беляева и др., 1994). Предложен ряд вариантов такой системы контактов, которая должна обеспечивать за приемлемое время охлаждение объектива до температур 80—10 К при минимальных перепадах температуры на контактах и допустимых температурных градиентах в охлаждаемых элементах.

Экспериментальные исследования и отработоч-

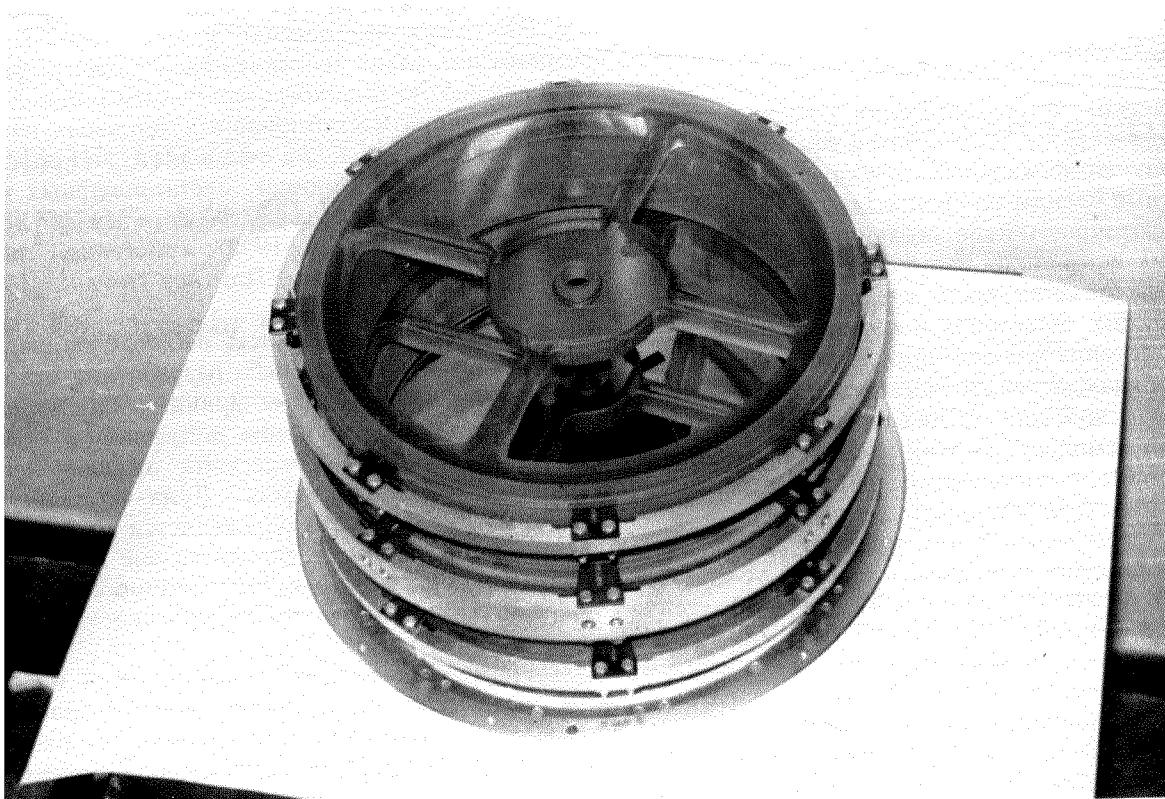


Рис. 1. Ситалловый объектив диаметром 350 мм для криогенного ИК-телескопа

ные испытания элементов и узлов криогенного телескопа проводились при выполнении конструкторско-технологических работ. Для криогенного астрономического телескопа «Холод-ИКФ» была предложена (Г. К. Кладов) и разработана конструкция цельноситаллового 4-зеркального объектива диаметром 350 мм (рис. 1). Эти объективы, изготовленные Крымской астрофизической обсерваторией, испытывались на специально изготовленных криогенно-вакуумных и криогенно-оптических стендах (руководитель работ — Н. М. Левченко). Криогенно-оптические испытания объектива проводились в видимом диапазоне спектра в режиме термоциклизации 300—10 К. В теплом состоянии угловой размер aberrационного кружка по всему полю зрения объектива не превышал 20''. В процессе термоциклизации при градиентах температуры на объективе до 50 К aberrационный кружок увеличивался до 22''. В установившемся «холодном» состоянии при максимальном градиенте температу-

ры на объективе не более 10 К и в установившемся «теплом» состоянии после отогрева размер aberrационного кружка был практически равен 20''.

Широкоугольный ( $14^\circ$ ) светосильный ( $D/f = 1:1.25$ ) зеркальный объектив диаметром 120 мм из ситалла (два зеркала — асферические, два — сферические), разработанный и изготовленный совместно с НПО «Измерительная техника» (Калининград, Московская обл.) испытывался в интервале температур 300—20 К (руководитель разработки — В. М. Науменко). Испытания этого объектива показали, что в установившемся «холодном» состоянии при 20 К он имеет примерно такое же качество изображения, что и при 300 К.

Объектив испытывался на специализированном стенде, разработанном для исследований оптико-электронного тракта криогенных телескопов в видимом и ИК-диапазонах спектра (руководитель разработки — В. М. Науменко). Стенд содержит криогенный коллиматор (диаметр 200 мм, фокус-

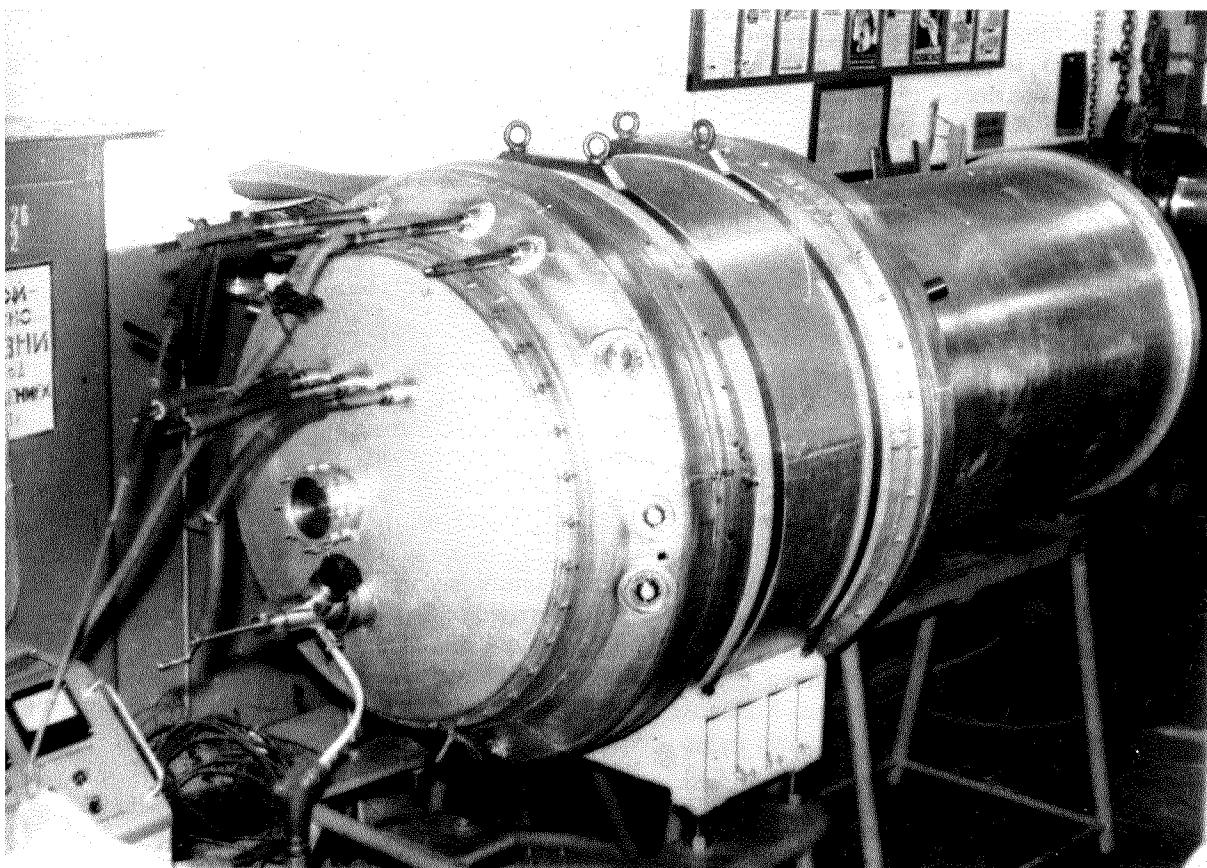


Рис. 2. Полномасштабный макет криогенного ИК-телескопа

ное расстояние 1800 мм), оснащен источниками калибровочного, фонового и сигнального потоков излучения, фотоприемным устройством, системами поддержания и контроля температур, обработки информации. В стенде можно обеспечить три независимых уровня охлаждения в интервале 5—300 К, углы падения на вход объектива потока излучения в интервале  $0 \pm 10^\circ$  с точностью установки  $30''$ .

В 1982—1989 гг. был разработан и изготовлен полномасштабный макет криогенного астрономического ИК-телескопа, предназначенного для измерения пространственного распределения и спектральных характеристик излучения дискретных и протяженных космических источников в диапазоне 6—25 мкм (руководители разработки — Г. К. Кладов, Б. П. Ткач). Предполагалось, что телескоп будет работать на орбите высотой 400—450 км в режиме сканирования небесной сферы.

Объектив телескопа (см. рис. 1) имеет диаметр 350 мм, относительное отверстие 1 : 3.3, угол поля

зрения  $48'$ , aberrационный кружок рассеяния по всему полю не более  $20''$ . Спектральные диапазоны: 6—9, 9—13, 14—20, 6—25 мкм. Фокальные приборы — два фильтровых фотометра низкого ( $4' \times 12'$ ) и высокого пространственного разрешения.

Криогенная система — криостат со сверхтекучим гелием при температуре 1.8 К, объем гелия 400 л. Температура фотоприемников  $\sim 3$  К, оптики  $\sim 20$  К, бленды 35—40 К. Габариты телескопа: диаметр 1250 мм, длина 2400 мм. Масса телескопа 450—500 кг. Общий вид макета телескопа показан на рис. 2.

В настоящее время для решения различных задач дистанционного зондирования Земли из космоса разрабатывается ИК-спектрорадиометр (руководитель проекта — В. М. Науменко) для космического аппарата «Сич» с высотой орбиты 600—700 км. Проектом предусматривается, что радиометр должен иметь несколько спектральных каналов в диапазонах 3...5 и 8...13 мкм; пороговая разность

температур не хуже 0.1—0.3 К, абсолютная точность радиометрической калибровки — не хуже 10 %. Пространственное разрешение радиометра должно составлять 50 м (в надире) при полосе захвата 50 км с возможностью перенацеливания вперед — назад на 20° и вправо—влево на 40°.

В радиометре будет использоваться зеркальный объектив с диаметром входного зрачка 300 мм и фокусным расстоянием 750 мм; угол поля зрения объектива  $\sim 4.8^\circ$ . В качестве приемников ИК-излучения предполагается использовать отечественные линейки с чувствительными элементами на основе КРТ и ПЗС-коммутатором на кремнии. Линейка каждого спектрального канала содержит 1200 чувствительных элементов размером  $50 \times 50 \text{ мкм}^2$  и комплектуется охлаждаемым полосовым светофильтром. Рабочая температура приемников 75—78 К, обнаружительная способность  $3 \cdot 10^{10}$  —  $1 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$ .

Для охлаждения элементов фотоприемного устройства (линейки, светофильтры, диафрагмы и защитные экраны) используется комбинированная система, содержащая аккумулятор холода и газовую криогенную машину Сплит-Стирлинга с линейным электромеханическим приводом. Холодопроизводительность машины — 10 Вт, ресурс — не менее 5000 часов. Фотоприемники монтируются внутри аккумулятора холода, что обеспечивает стабильность температуры приемников. Масса криогенной системы не более 85 кг, масса спектрорадиометра не более 400 кг.

1.2. Для решения различных прикладных и народнохозяйственных задач проводятся разработки и изготовление радиометрической и тепловизионной ИК-аппаратуры с охлаждаемыми фотоприемными устройствами (руководитель разработок — А. И. Щерковский).

Разработан проект стереоскопической тепловизионной системы длястыковки пилотируемого космического аппарата с некооперируемыми КА на теневой стороне Земли. Прибор имеет три сменных поля зрения:  $2^\circ \times 2^\circ$ ,  $4^\circ \times 4^\circ$  и  $8^\circ \times 8^\circ$  с угловым разрешением соответственно  $1' \times 1'$ ,  $2' \times 2'$  и  $4' \times 4'$  при 100 % модуляции сигнала, частота кадров — 25 Гц, чувствительность к температурному контрасту 0.2 К. В качестве приемника излучения используется 64-элементная линейка с размерами чувствительных элементов  $50 \times 50 \text{ мкм}^2$  из материала КРТ (кадмий—ртуть—теллур) с максимумом спектральной характеристики на 12 мкм. Приемник имеет рабочую температуру 80 К, которая обеспечивается дроссельной криогенной системой, работающей от баллонов высокого давления с газообразным азотом. В состав тепловизионной систе-

мы входит корреляционный блок, позволяющий по стереопаре изображений определять расстояние до заданной детали конструкции КА.

Для дистанционного исследования земной поверхности с борта аэросъемочных самолетов был создан сканирующий радиометр-спектрофотометр (РСФ) с азотным уровнем охлаждения. Радиометр построен по схеме измерения абсолютных сигналов, имеет угол обзора  $60^\circ$ , ИК-съемка может производиться одновременно в 5 спектральных диапазонах (4 диапазона в области 0.6—1.1 мкм, интегральный диапазон 8—14 мкм). Прибор представляет собой комплекс аппаратуры, выполняющей многоспектральную съемку, регистрацию сигналов, визуализацию изображений на экране телевизионного монитора, предварительную обработку сигналов, ввод в ЭВМ и окончательную целевую обработку изображений.

В последние годы были разработаны малогабаритные сканирующие тепловизионные системы для исследования земной поверхности с борта легких авианосителей. Эти приборы имеют угол обзора  $60^\circ$ , рабочий диапазон длин волн 8—14 мкм, угловое разрешение 1—2 мрад, чувствительность к температурному контрасту 0.1 К. Измеряемая информация вводится непосредственно в ПЭВМ и может затем выводиться в реальном масштабе времени на дисплей в монохромном или цветном виде. На рис. 3 изображена одна из таких тепловизионных систем массой до 4 кг.

Проведены экспериментальные исследования эффективности применения авиационной ИК-аппаратуры для решения задач экологического и сельскохозяйственного мониторинга. На Шебелинском экспериментальном полигоне с борта самолета АН-2 радиометр РСФ уверенно обнаруживал с высоты 300 м утечки газа с дебетом до  $70 \text{ м}^3/\text{сут}$  из магистральных газопроводов. На поверхности Черного моря аппаратура обнаруживала с высоты 1500 м пятна, соответствующие  $\sim 10 \text{ л}$  нефтепродуктов. Работы на озере Дрюкшай позволили определить масштабы теплового загрязнения окружающей среды сбросами Игналинской АЭС. Эксперименты по сельскохозяйственному мониторингу показали, что ИК-радиометр позволяет составлять земельный кадастровый план, определять продуктивность полей, горных пастбищ и др.

Разработанная ИК-аппаратура используется в Институте геологических наук НАН Украины, Экологическом Центре Беларусь, Институте караульеводства АН Казахстана, Институте лесного хозяйства АН Чехии и ряде других организаций.

1.3. На основе результатов исследований и разработок ФТИНТ в области фундаментальной сверх-

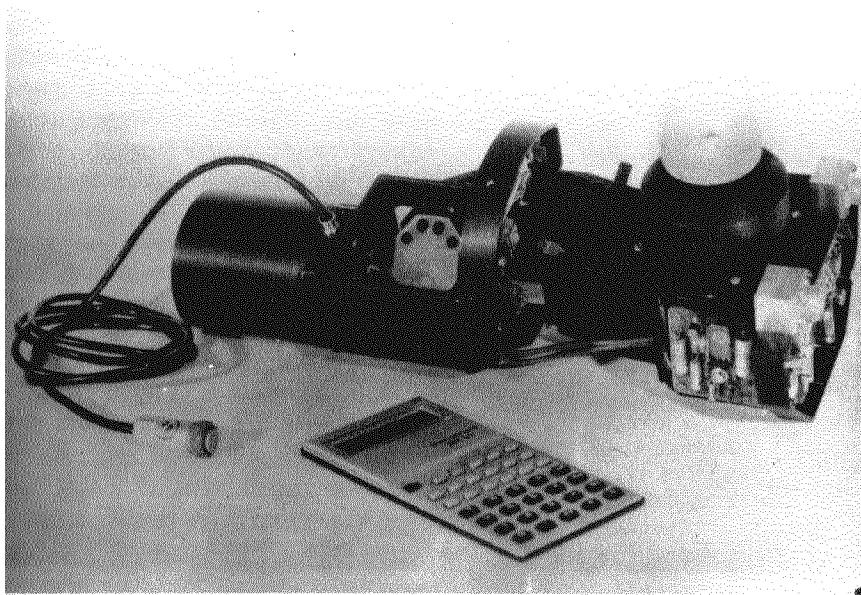


Рис. 3. Малогабаритная тепловизионная система для исследования земной поверхности

проводимости и гелиевых систем охлаждения созданы сверхпроводниковые (СП) неселективные болометры—приемники ИК-излучения, предназначенные для высокочувствительных радиометрических, спектрометрических и тепловизионных систем (Бондаренко, Иванов, 1985; Коноводченко и др., 1987; Verkin et al., 1980).

Основные характеристики базовых типов инфракрасных СП приемников: спектральный диапазон — 2...25 мкм (с возможным расширением до 500 мкм); НЕР =  $1.4 \cdot 10^{-15} \dots 3 \cdot 10^{-12}$  Вт/Гц $^{1/2}$  при постоянной времени соответственно  $3.2 \cdot 10^3 \dots 1.1 \cdot 10^5$  с. Рабочая температура ИК-приемников в зависимости от их типа и назначения составляет ~ 0.3...2 К. Для охлаждения приемников и приемных блоков ИК-аппаратуры (фотометры, спектрофотометры и др.) разработана и изготавливается серия автономных малогабаритных криогенных систем с рефрижераторами на  $\text{He}^4$  и  $\text{He}^3$ . Такие криогенные системы работают в составе ИК-фотометра и спектрофотометра наземных астрономических телескопов для охлаждения СП болометров и согласующей оптики.

Разработан, изготовлен и установлен на 125-см телескопе Крымской лаборатории Государственного астрономического института им. Штернберга (ГАИШ) ИК-фотометр для астрономических исследований (Коноводченко и др., 1992в). Порог чувствительности фотометра в спектральном диапазоне

8—12 мкм, измеренный по трем стандартным звездам, составляет  $\sim 1 \cdot 10^{-14}$  Вт/Гц $^{1/2}$ , что в 2—3 раза ниже фотонного шума телескопа. Проведено фотометрирование переменной звезды СН Суг и двойной звезды  $\beta$  Per. Для двойной звезды СН Суг, имеющей пылевую оболочку, зарегистрировано увеличение яркости в 1.5 раза по сравнению с наблюдениями 1987 г. Измеренный впервые поток на 10 мкм от  $\beta$  Per соответствует предсказанному для звездных компонентов этой двойной системы, что означает отсутствие у нее пылевой околозвездной оболочки.

Для наземного телескопа АЗТ-24 разработан и изготовлен быстродействующий фильтровый ИК-спектрофотометр (Коноводченко и др., 1992б), предназначенный для использования в системах экологического мониторинга и контроля околоземного космического пространства, для астрофизических исследований (рис. 4). В фотометре используется высокочувствительный СП болометр, работающий при температуре ниже 1 К. Фотометр имеет в диапазоне 3.45—14.9 мкм восемь спектральных полос, выделенных холодными фильтрами и соответствующих стандартным фотометрическим полосам (можно расширить спектральный диапазон до 1—1000 мкм). Чувствительность фотометра ограничена только фотонным шумом телескопа и атмосферы (в спектральном диапазоне 8—12 мкм в среднем величиной  $2 \cdot 10^{-14}$  Вт/Гц $^{1/2}$ ).

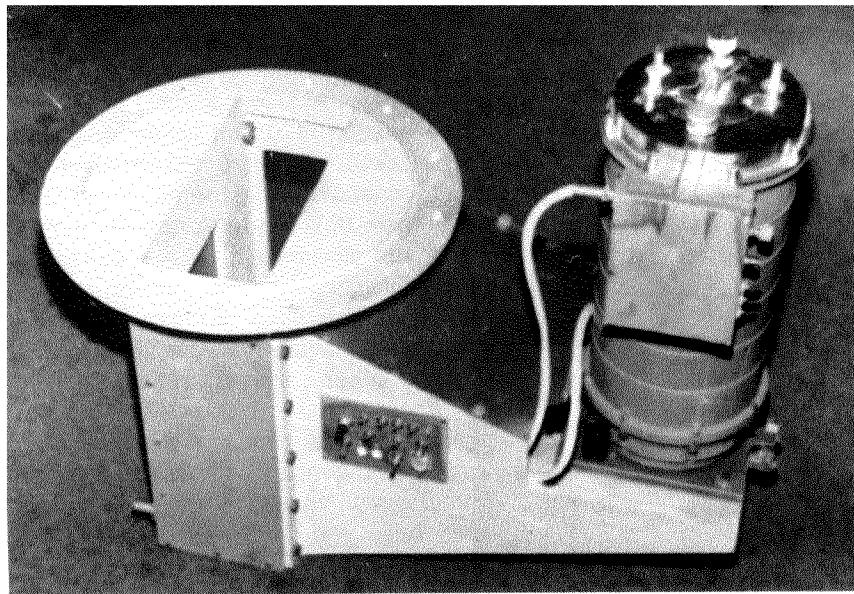


Рис. 4. Инфракрасный спектрофотометр (в гелиевом криостате) для наземного телескопа

Проведены натурные испытания ИК-спектрофотометра на обсерватории (г. Майданак, 2700 м над уровнем моря). Спектрофотометрия искусственных космических объектов показала, что даже при использовании телескопа средних размеров (диаметр 0.5 м) зарегистрированная в реальном масштабе времени кривая блеска достоверно характеризует объекты. При фотометрировании небольшого ИСЗ (площадь сечения менее 1 м<sup>2</sup>) на дальности около 2000 км температура его поверхности была определена с погрешностью 1–2 К.

Разброс фотометрических отсчетов эталонной звезды ( $\alpha$  Нег) во время сеанса наблюдений не превышала 0.5 %, что сравнимо с естественными изменениями условий наблюдения.

Разработаны и изготовлены низкофоновые метрологические стенды для аттестации энергетических характеристик сверхпроводниковых и полупроводниковых ИК-приемников (Коноводченко и др., 1992а). Эти стенды работают в НПО «Орион», НПО «Пульсар» и НПО «Электрон».

Создан уникальный абсолютный ИК-радиометр для аттестации интенсивности источников излучения, предназначенный для применения в системе Государственных эталонов низких уровней энергетической освещенности. Разработаны и изготовлены экспериментальные образцы низкофоновых метрологических комплексов нового поколения для

аттестации практически любого типа современных приемников ИК-излучения по всем основным параметрам в условиях низких и сверхнизких уровней освещенности. Впервые обеспечена прямая проверка абсолютными средствами.

## 2. РАЗРАБОТКА СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ МАГНИТОМЕТРОВ

В СКТБ ФТИНТ более 20 лет успешно проводились работы по созданию и применению высокочувствительных сверхпроводниковых магнитометров на основе сквидов (Бондаренко, Шеремет, 1982; Бондаренко и др., 1985). Уровень этих разработок в значительной степени определял достижения бывшего СССР. Большой опыт накоплен в создании бортовых СП-магнитометров.

Традиционно на отечественные и зарубежные КА устанавливались несверхпроводниковые магнитометры. Привлекательность СП-магнитометров заключается в их более высокой (на порядки) чувствительности, помехозащищенности и в малом энергопотреблении. Так, чувствительность изготовленных образцов магнитометров достигает  $10^{-14}$ – $10^{-15}$  Т/Гц<sup>1/2</sup>, в градиентометрическом варианте —  $10^{-13}$  Т/Гц<sup>1/2</sup>. м при астатизме  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  (при базе 20 см). При этом разработаны новые методы подав-

ления и компенсации помех до указанных выше значений индукции поля и градиента. Малое энергопотребление СП-магнитометров становится особенно важным при дальних длительных полетах, когда плотность потока солнечной энергии становится недостаточной для функционирования несверхпроводящих магнитометров.

В 1993—1994 гг. в рамках Государственной космической программы Украины по проектам «Раскат» и «Сканер» выполнены первые этапы работы по созданию космического СП-магнитометра на базе ВТСП материалов с рабочей температурой 77—80 К (Shablo et al., 1994). Результаты этих исследований могут быть положены в основу разработки перспективного помехозащищенного космического магнитометра с чувствительностью  $10^{-13}$ — $10^{-14}$  Т/Гц $^{1/2}$  для решения задач прогноза землетрясений по проекту «Предупреждение».

### 3. МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Масс-спектрометрический метод — наиболее универсальный физический метод анализа состава остаточных газов и веществ, основанный на разделении частиц по отношению массы к заряду. Он дает полную качественную и количественную характеристику смесей веществ с высокой чувствительностью и точностью. Только с помощью масс-спектрометрической (МС) аппаратуры, работающей непосредственно в условиях космического пространства, возможно решение важнейших фундаментальных и прикладных задач космотехнологии: определение состава и динамики собственной внешней атмосферы КА, характеристик процессов маскопереноса вблизи корабля, дегазации и десорбции конструкционных материалов и т. п. Бортовые МС-приборы, устанавливаемые на ракетах, спут-

никах или спускаемых аппаратах, являются одними из основных инструментов для измерения газового состава атмосфер Земли и планет.

Ранее применение МС-приборов было ограничено их большими габаритами, массой и сложностью аппаратуры. В СКТБ ФТИНТ впервые был разработан и изготовлен радиочастотный монополярный масс-спектрометр, который стал основой целой серии МС-приборов, нашедших применение в космическом приборостроении, физических экспериментах и различных отраслях народного хозяйства (Багров и др., 1969).

Масс-спектрометры второго поколения Р-10, AMC-10 и PMC-10 являются бортовыми приборами: Р-10 предназначен для работы в открытом космическом пространстве на искусственных спутниках Земли и орбитальных станциях; PMC-10 — ракетный масс-спектрометр для зондирования атмосферы на высотах от 40 км и выше; AMC-10 предназначен для продолжительной работы на аэростатах на высотах от 25 км и выше. Все приборы оснащены азотными и гелиевыми крионасосами высокой производительности. Масс-спектрометр «Монополь» предназначен для стендовых исследований в имитаторах космического пространства, оснащен автономными системами вакуумирования, калибровки по эталонным веществам, управляемой ПЭВМ с банком данных индивидуальных соединений. Основные параметры этих приборов приведены в табл. 1. На рис. 5 показан общий вид одного из бортовых масс-спектрометров.

Бортовые МС-приборы устанавливались на метеорологических ракетах МР-12 и ракетах типа «Вертикаль» для изучения газового состава верхних слоев атмосферы Земли (Багров и др., 1977). Установленные на спускаемых аппаратах «Венера-9» и «Венера-10» приборы измеряли состав подоблачного слоя атмосферы Венеры (Сурков и др., 1978). На основе полученных результатов измерений были

Таблица 1. Основные параметры масс-спектрометров

Параметр	Р-10	AMC-10	PMC-10	«Монополь»
Диапазон анализируемых массовых чисел, а. е. м.	2...200	2...200	2...150	2...600
Разрешение на уровне 10 % высоты пика Ar	1	1	1	0.5
Чувствительность, об. %	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Скорость развертки, с	100	4...40	0.5; 0.2	40...2000
Напряжение питания, В	27	27	27	380/220
Потребляемая мощность, Вт	28	28	18	1500
Габаритные размеры, мм	$\varnothing 170 \times 500$	$\varnothing 600 \times 500$	$\varnothing 300 \times 500$	$800 \times 680 \times 850$
Масса, кг	9	70	15	85

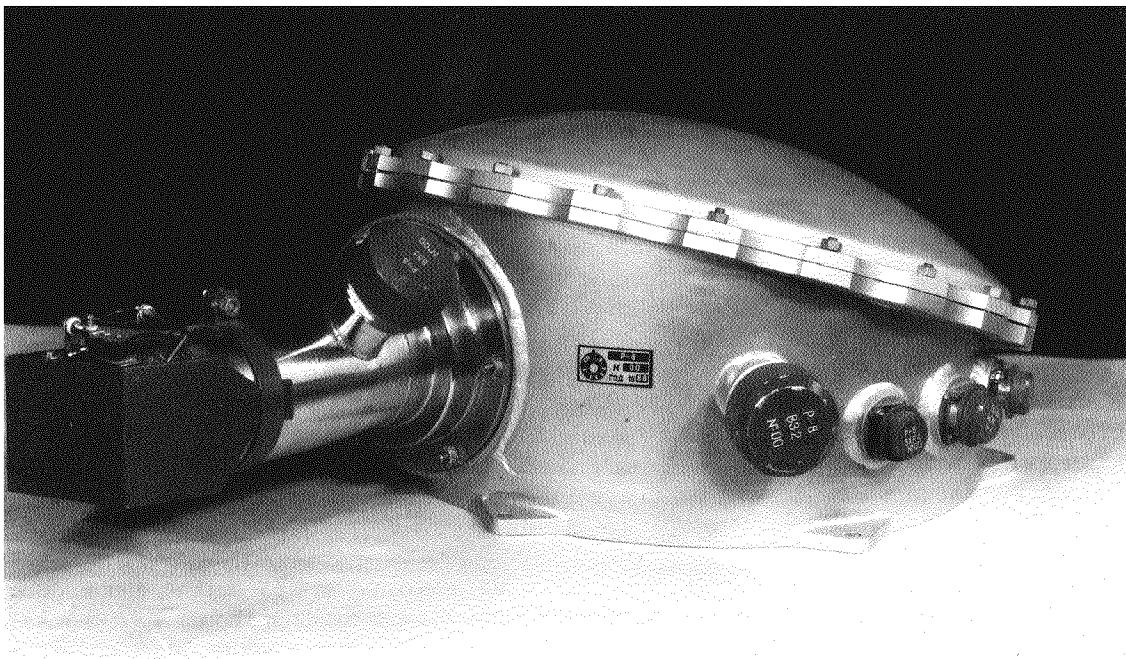


Рис. 5. Общий вид спутникового масс-спектрометра

определенны содержание азота и верхний предел содержания аммиака, впервые обнаружено присутствие соединений серы.

На борту ИСЗ «Космос-1643» и «Космос-2007» с помощью МС-приборов измерялись состав и динамика собственной внешней атмосферы спутников, пространственное распределение молекулярных потоков в зоне установки приборов (Басс и др., 1994).

В настоящее время разработаны опытные образцы МС-аппаратуры для технологических экспериментов на ИСЗ КБ «Южное» и для лабораторных исследований масштабных моделей узлов и систем космической техники в имитаторе условий космического пространства. Эти приборы отличаются от своих предшественников более высокими аналитическими характеристиками и улучшенными эксплуатационными и массогабаритными показателями.

#### 4. КРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Для обеспечения работы глубокоохлаждаемой космической аппаратуры необходимы соответствую-

щие системы охлаждения и термостабилизации, различные по температурным уровням, холодопроизводительности, ресурсу работы, механическим, электрическим, массо-габаритным и другим характеристикам.

Одним из наиболее простых и надежных типов бортовой системы криостатирования является пассивная расходная система — криостат (аккумулятор холода) с запасом твердого или жидкого криоагента на длительный период автономной работы. Переход от испарения жидкой к сублимации твердой фаз позволяет расширить температурный диапазон применения криоагентов (например азота — до 50 К), использовать запас скрытой теплоты фазового перехода и упростить задачу разделения паровой и конденсированной фаз в условиях невесомости.

В СКТБ ФТИНТ было разработано около 20 бортовых сублимационных систем охлаждения на температуры от 10 до 190 К с ресурсом от месяца до года непрерывной работы при полезных нагрузках от 0.05 до 2.0 Вт (Веркин и др., 1979; Веркин и др., 1985; Михальченко и др., 1979). В качестве криоагентов использовались твердый азот, аргон, неон, водород, метан, углекислота и аммиак. Пара-

Таблица 2. Параметры сублимационных криостатов

Тип криостата	Рабочая температура, К	Холодо-производительность, Вт	Криоагенты	Общая масса, кг	Ресурс, мес
КТ-7	50	0.060	N <sub>2</sub>	32	5
КТ-12	145	0.220	CO <sub>2</sub>	96	12
	55±80	0.065	Ar		
КТ-18	18	0.600	Ne	40	1
КТ-7В	10	0.060	H <sub>2</sub>	17.5	1.5
КТ-20	74	1.9	CH <sub>4</sub>	140	4
	170	2.2	NH <sub>3</sub>		

метры некоторых типов аккумуляторов холода приведены в табл. 2. На базе аккумулятора холода КТ-7 была изготовлена первая в СССР долгоживущая автономная система охлаждения для ИК-телескопа ИТС-К, которая успешно работала на орбитальной станции «Салют-4».

Для достижения высоких рабочих параметров и характеристик пассивных аккумуляторов холода был проведен комплекс исследований и разработок, направленных на изучение особенностей тепломассопереноса в системах теплозащиты криостата, в баках с рабочими криоагентами и в самих твердых криоагентах (Веркин и др., 1980; Веркин и др., 1985; Гетманец, Михальченко, 1982; Verkin et al., 1979; Mikhalchenko et al., 1990). Были предложены новые типы экранно-вакуумной теплоизоляции и отработана технология ее монтажа, разработана методика расчета и оптимизации конструкции теплозащиты, отработаны конструктивные решения основных узлов криостатов. Разработаны методы плотной заправки криостатов криоагентами, комплекс контрольно-заправочных и вспомогательных средств для обслуживания аккумуляторов холода на всех этапах подготовки и испытаний охлаждаемых приборов и устройств. Рассмотрены пути повышения эффективности таких расходных систем за счет сочетания их с другими охладителями, в частности, с радиационными системами (Кислов и др. 1979; Kislov et al., 1984).

Охлаждение до азотных температур на космических аппаратах может быть достигнуто с помощью радиационных систем. Одна из проблем при использовании таких систем связана с загрязнением и деградацией поверхностей излучателя и экранов теплозащиты при воздействии собственной внешней атмосферы корабля. Поэтому создание радиационных систем с большим ресурсом работы (1...5

лет) и на значительные полезные тепловые нагрузки (1 Вт и больше) является задачей, решение которой определяется как параметрами орбиты и ориентацией КА, так и его собственной атмосферой. Для определения возможности применения радиационных систем криостатирования применительно к конкретному космическому аппарату разработана методика расчета тепловых режимов таких систем при длительной работе на орбите, с помощью этой методики разработан ряд конструкций криогенных радиаторов.

Для обеспечения ресурса криогенной аппаратуры в несколько лет разработаны (Архипов и др., 1990; Михальченко и др., 1986) замкнутые комбинированные системы охлаждения с аккумулятором плавления и активным генератором холода, в качестве которого был использован компрессионно-дроссельный рефрижератор периодического действия (рис. 6). Размещение охлаждаемого объекта в криостате-аккумуляторе холода позволяет свести к минимуму конструктивные теплопритоки на криогенном уровне, практически исключить потери на хладопроводах, эффективно соединить рефрижератор с аккумулятором. Высокий ресурс работы системы в целом обусловлен гарантированным ресурсом компрессорного агрегата и дроссельной системы на газовой смеси (3...5 тыс. ч). Такие характеристики получены за счет использования безмоментного привода, комбинированного фильтра-адсорбера в рабочем контуре газовой смеси, щелевого уплотнения без смазки в узле поршень—цилиндр компрессора.

За счет выбора эффективной рабочей смеси (азот—углеводороды) и высокого КПД компрессора сама дроссельная холодильная система на уровне температур 80—82 К обеспечивает холодильный коэффициент 3...3.5 % или эксэнергетический КПД 8...9 %, что является высокими показателями для данного класса агрегатов. Система может вырабатывать до 40 Вт холода при энергопотреблении 1100 Вт постоянного тока (27 В) и кратности пускового тока 1.4. Разработаны системы, работающие от сети переменного тока и половинной мощности, что позволяет расширить диапазон применения таких автономных комбинированных систем криообеспечения. Система достаточно просто перестраивается на температурные уровни от 80 до 200 К. Для ее обслуживания и проведения испытаний создан комплекс контрольно-заправочного и вспомогательного оборудования, обеспечивающего цикл изготовления и эксплуатации охлаждаемой аппаратуры.

При понижении температуры криостатирования эффективность дроссельных систем на газовых сме-

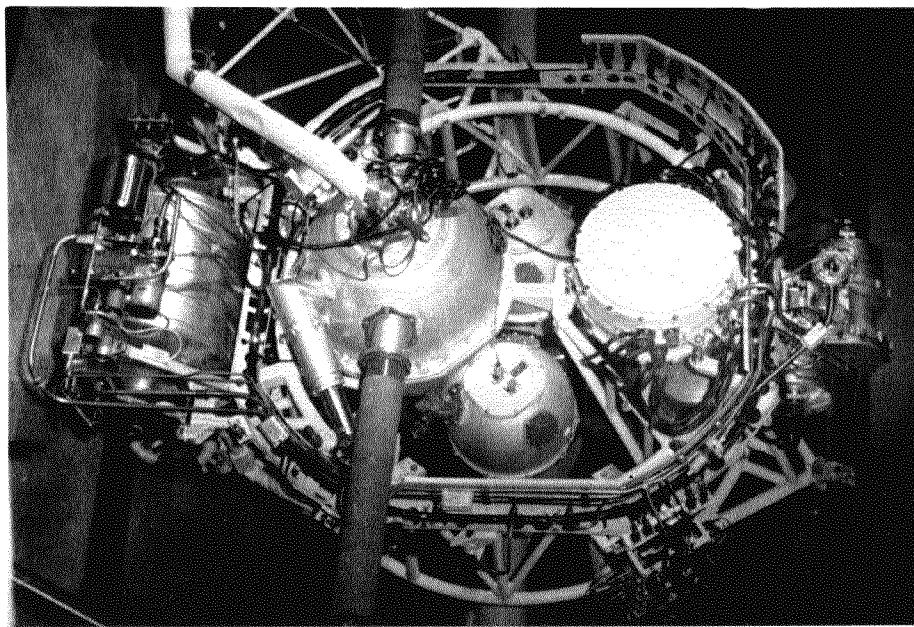


Рис. 6. Бортовая система криостатирования с аккумулятором плавления и дроссельной системой на газовых смесях

сях снижается и возможна их забивка твердой фазой высококипящих компонентов смеси. Для обеспечения температур 75 К и ниже предпочтительнее использовать в качестве генератора холода комбинированных систем газовые криогенные машины «Стирлинг». При этом из-за значительного собственного теплопритока по конструкции машины в линии ее тепловой связи с криоаккумулятором приходится использовать отключаемый хладопровод или дополнительный циркуляционный контур. Альтернативой такой схеме может быть применение в качестве источника холода газовой криогенной машины Сплит-Стирлинга. Ее эффективность ниже традиционной, но благодаря тепловой и механической развязке компрессионной и низкотемпературной частей она более удобна для комбинированной системы охлаждения с криоаккумулятором.

Такая схема используется нами в разрабатываемой системе охлаждения ИК-спектрорадиометра для КА «Січ» по проекту государственной космической программы Украины. Комбинированная система на рабочую температуру 80 К с полезной холодопроизводительностью 0.3—0.5 Вт и ресурсом 1 год должна иметь энергопотребление 70 Вт (среднесуточное 25 Вт) при массе не более 15 кг (включая системы управления и обеспечения теплового режима). Отметим, что сублимационная

система на твердом метане с примерно такими же параметрами (80 К, холодопроизводительность 0.1 Вт, ресурс 1 год) будет иметь массу 40—50 кг.

##### 5. КРИОГЕННО-ВАКУУМНЫЕ ИМИТАТОРЫ УСЛОВИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Для отработки конструкций и испытаний на функционирование узлов, агрегатов и приборов космических аппаратов, а также для решения широкого круга задач космического материаловедения необходимы наземные испытательные и исследовательские установки-имитаторы основных факторов космического пространства.

В имитаторе должны моделироваться прежде всего такие факторы космического окружения: высокий вакуум ( $10^{-6}$ — $10^{-9}$  торр); стерильность вакуума, т. е. отсутствие загрязнений, не свойственных космической среде; низкая температура окружающей среды; допустимо малые коэффициенты возврата молекул и потоков излучения на объект испытаний («чернота» космоса). Наряду с космическим вакуумом в имитаторах необходимо моделировать излучение Солнца и планет, потоки заряженных частиц (протоны, электроны) и, в общем случае, некоторые другие факторы.

Моделирование условий космического вакуума

обеспечивается в наибольшей степени при откачке вакуумной камеры имитатора встроенным криогенными насосами. Для решения проектно-конструкторских задач при создании установок были проведены теоретические и экспериментальные исследования в области физики криогенного вакуума, сформулированы физические основы моделирования условий космического пространства (Веркин и др., 1968а). Разработаны эффективные методы решения задач молекулярного и лучистого переноса в криовакуумных системах реальной конструкции (Калашник и др., 1967; Житомирский, Кислов, 1976; Кислов, Романенко, 1980), с помощью которых исследованы характеристики откачки таких систем в неравновесных условиях, проведены расчеты и оптимизация конструктивных параметров криогенных насосов.

В результате проведенных расчетно-теоретических, экспериментальных и конструкторских работ были созданы криовакуумные имитаторы с камерами различного объема для решения задач космического материаловедения и испытания отдельных узлов и агрегатов космических аппаратов (Веркин и др., 1968б; Бабенко и др., 1985). Комплексное воздействие факторов космического пространства имитируется в установках ВК18 и ВК3, которые откачиваются встроенными азотно-гелиевыми криоконденсационными насосами. Вакуумные камеры этих установок имеют параметры: полезный объем  $50\text{ л}$  и  $3\text{ м}^3$ , предельный вакуум  $5 \cdot 10^{-10}$  и  $2.4 \cdot 10^{-10}$  торр, скорость откачки криогенного насоса по азоту  $18 \cdot 10^3$  и  $3 \cdot 10^5\text{ л/с}$  соответственно.

В этих установках имитируется видимое и инфракрасное солнечное излучение ( $0.2$ — $2.5\text{ мкм}$ , плотность потока до  $4\text{ кВт/м}^2$ ), ВУФ-излучение Солнца ( $50$ — $200\text{ нм}$ ) и мягкое рентгеновское излучение ( $1.5$ — $30\text{ нм}$ ). Протонно-электронный инжектор создает потоки электронов и протонов с энергиями до  $200\text{ кэВ}$  и токами на мишени  $50\text{ мА}$  и  $1\text{ мА}$  соответственно.

В установках В26А и В60 имитируется высокий вакуум, холод и чернота космического пространства (полезный объем  $70\text{ л}$  и  $100\text{ л}$ , предельный вакуум  $5 \cdot 10^{-10}$  торр).

Для проведения исследований и испытаний в условиях сверхвысокого вакуума и низкой температуры были разработаны и изготовлены имитаторы СВВК-100 и В41. В этих установках с полезным объемом  $100\text{ л}$  и  $2\text{ м}^3$  достигается предельный вакуум  $1 \cdot 10^{-12}$  торр и скорости откачки камеры по азоту  $3 \cdot 10^4$  и  $2 \cdot 10^5\text{ л/с}$  соответственно.

Высоковакуумные установки с безмаслянной системой откачки СВВК-БМО (объем  $200\text{ л}$ ) и «Вероника» (объем  $300\text{ л}$ ) были разработаны и изготовлены

для испытания объектов в условиях стерильного и «холодного» вакуума. Криоконденсационный и криосорбционный насосы, охлаждаемые до  $20\text{ К}$ , обеспечивают предельный вакуум  $5 \cdot 10^{-9}$  и  $5 \cdot 10^{-10}$  торр.

Для имитации в установках воздействия заряженных частиц на материалы и узлы космической аппаратуры были созданы протонно-электронные инжекторы и ускоритель положительных ионов  $\text{He}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Ne}$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{Kr}$  и  $\text{Xe}$  на энергию  $20$ — $200\text{ кэВ}$  (Маркус и др., 1980).

В качестве источника ВУФ-излучения Солнца (диапазон  $50$ — $200\text{ нм}$ ) используются разработанные и изготовленные в институте газоструйные источники ГИС-1, ГИС-2, ГИС-3, принцип работы которых основан на возбуждении сверхзвуковой струи смеси аргона, криптона и неона плотным электронным пучком (Веркин и др., 1974). В последнее время разработан газоструйный источник излучения с коротковолновой границей  $10\text{ нм}$ .

При наземных испытаниях космической ИК-аппаратуры необходимы источники излучений, имитирующие фоново-целевую обстановку, в частности, имитатор ИК-фона верхней атмосферы Земли. Разработан и изготовлен такой имитатор ИК-фона атмосферы Земли на высотах  $90$ — $250\text{ км}$  в спектральном диапазоне  $2$ — $20\text{ мкм}$  (руководитель разработки — Э. Т. Верховцева). Излучение имитатора генерируется колебательно-возбужденными молекулами атмосферных газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и др.) при воздействии на сверхзвуковую струю этих газов высокочастотного электрического разряда.

## 6. КОСМИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

Космическое материаловедение включает в себя широкий круг задач, связанных с исследованиями физико-химических свойств различных конструкционных материалов и покрытий в условиях длительного воздействия на них высокого вакуума, низких температур, электромагнитного и корпускулярного излучений и других факторов. Результаты исследования воздействий электромагнитного и корпускулярного излучений на материалы и покрытия, полученные в работах Б. И. Веркина, А. М. Маркуса, В. Ф. Удовенко, В. В. Абраимова и др., будут рассмотрены в специальных статьях. Здесь рассматриваются результаты исследований и разработок по таким направлениям космического материаловедения, как криогенно-вакуумное конструкционное и триботехническое материаловедение.

6.1. В задачи криогенно-вакуумного материаловедения входило создание и исследование новых конструкционных материалов, способных длительно и надежно работать в условиях космического пространства. Требовалось обеспечить сочетание таких свойств материалов, как высокая удельная прочность, достаточная пластичность, высокая усталостная прочность и трещиностойкость, высокий модуль упругости, низкий удельный вес, высокая структурная, размерная и конфигурационная стабильность, высокая теплопроводность, низкий коэффициент термического линейного расширения (КТЛР).

Были изучены закономерности поведения физико-механических характеристик широкого класса конструкционных и функциональных, в частности, оптических материалов для космической техники (чистые металлы, аустенитные нержавеющие стали, титановые, алюминиевые, никелиевые, бериллиевые сплавы, ситалл, полимеры и др. материалы, их сварные, клеевые соединения) в экстремальных условиях: низкие температуры, высокие статические и динамические нагрузки, магнитные поля, сложно-напряженное состояние (Лаврентьев, 1991).

Обнаружены нетривиальные закономерности в поведении ряда материалов, которые нельзя было предсказать путем простой экстраполяции свойств в область низких температур. Например, резкое падение предела текучести метастабильных нержавеющих сталей (типа X18Н9Т) в области температур 200 и 77 К, значительное увеличение пластичности с одновременным увеличением прочности этих сплавов при понижении температуры, что обусловлено фазовыми структурными превращениями, происходящими в материале (Плищев et al., 1983).

Впервые обнаружен переход КТЛР к отрицательным значениям при 20 К в сплавах Fe-Cr-Ni и Fe-Ni, что связано с изменением магнитного упорядочения материала (переход в состояние спинового стекла) при понижении температуры (Плищев et al., 1978).

Количественные исследования микроструктуры и фазового состояния, а также механизмов упрочнения и разрушения материалов при низкотемпературной деформации (до 4.2 К) позволили выработать критерии пластичности и прочности материалов и выяснить причину потери работоспособности материалов в экстремальных условиях (Гринберг, 1988; Lavrentev et al., 1992).

Исследована размерная и структурная стабильность материалов в условиях силовых и температурных воздействий, для большинства материалов

этим данные получены впервые (Lavrentev et al., 1983).

В интервале температур 300—4.2 К детально исследованы теплофизические характеристики конструкционных материалов (КТЛР, удельная теплопроводность), их электрические и магнитные свойства. Создана база данных о комплексе физико-механических свойств материалов специального назначения, что позволяет выработать критерий отбора и оптимального сочетания материалов в узлах космических аппаратов. Для проведения исследований разработано и изготовлено уникальное испытательное оборудование.

Кроме разработки новых материалов с повышенными теплофизическими и механическими характеристиками решались задачи улучшения свойств известных традиционных материалов. Впервые была предложена и разработана технология криогенной термомеханической обработки — низкотемпературное силовое циклирование. Такая криогенная технология значительно повышает, по сравнению с обычными видами термообработки, дефектность структуры, изотропность свойств и размерную стабильность конструкционных материалов, что приводит к улучшению их механических и эксплуатационных показателей.

Результаты исследований и разработок использовались при создании различных изделий космической техники, в частности, «Лунохода» и «Марсохода». Работы выполнялись совместно с ГОИ им. Вавилова, НПО «Композит», ВИАМ, НПО «Геофизика», НПО им. С. А. Лавочкина, ЦНИИМВ в рамках комплексных научно-технических программ, в том числе программы «Космическая физика металлов» (1986—1991 гг.).

6.2. Развитие космического материаловедения стимулировало исследования процессов трения и изнашивания материалов при их фрикционном контакте, разработку принципов обеспечения надежной и долговечной работы узлов трения КА в вакууме, газовых средах заданного состава и давления, криогенных жидкостях.

Разработаны и эффективно используются оригинальные методики для определения коэффициентов трения, интенсивности изнашивания, фрикционной долговечности, задиростойкости, несущей способности и прирабатываемости различных конструкционных материалов и тонкослойных покрытий с антифрикционными компонентами, перспективных для применения в изделиях космической техники.

Обнаружено, что механизм взаимодействия материалов в зоне контакта определяется как внешними параметрами трения (средой, нагрузкой, скоростью скольжения и т. п.) и исходными свойства

ми материалов, так и внутренними термодинамическими параметрами трибосистемы, в первую очередь динамикой структурных и фазовых превращений в поверхностных и подповерхностных слоях материалов. Установлено наличие критических параметров трения, лимитирующих образование износостойких вторичных структур, что приводит к резкому изменению триботехнических характеристик материалов (Любарский, Палатник, 1976).

Исследованы особенности структурных и фазовых превращений, механизмов трения и изнашивания в вакууме и при низких температурах. Предложен новый подход к проектированию узлов трения, основанный на представлении о материале активного слоя пары трения как сложной самоорганизующейся системе. Это позволило значительно расширить область применения существующих конструкционных материалов и покрытий, способствовало созданию новых антифрикционных и износостойких материалов с заданными свойствами.

Для железоуглеродистых сплавов и цветных металлов, антифрикционных твердых смазочных покрытий (ТСП) с дисульфидом молибдена были разработаны технологические методы повышения износостойкости металлических материалов и увеличения долговечности ТСП при одновременном уменьшении силы трения (Гамуля и др., 1981).

На основании исследования сверхтвердых ионоплазменных покрытий из нитрида титана, нанесенных на стальные поверхности, эти материалы рекомендованы для узлов трения, работающих в криогенных жидкостях и в абразивных средах (Gamulya et al., 1994). Проведенные исследования твердых тонкопленочных покрытий с антифрикционными компонентами позволили создать ряд новых ТСП для узлов трения, функционирующих в условиях переменного воздействия факторов окружающей среды: термоциклирования, циклирования воздух — вакуум, криогенная жидкость — ее пары — воздух (Лебедева и др., 1989).

На основе теоретических представлений о динамике структурных и фазовых превращений в зоне реальных фрикционных контактов с использованием методов планирования эксперимента разработаны методики проведения ускоренных триботехнических испытаний и прогнозирования долговечности узлов трения в условиях, моделирующих воздействие на пару трения основных факторов космического пространства (Gamulya et al., 1994).

Для систематизации и оперативного использования экспериментальных данных по триботехническим характеристикам материалов и покрытий разработана информационно-поисковая система «Трение и изнашивание материалов в вакууме и при

низких температурах». Полученные экспериментальные данные были аттестованы ВНИЦ МВ Госстандарта в качестве рекомендуемых справочных данных ГССД. В 1994 г. Европейская Трибологическая Лаборатория по результатам проведенной экспертизы аттестовала разработанные вакуумный и криогенный трибометры.

Результаты исследований триботехнических характеристик материалов и покрытий в вакууме при низких температурах были использованы при разработке узлов трения различных аппаратов и механизмов космической техники, при подготовке и реализации проектов «Союз», «Салют», «Космос», «Луноход», «Союз—Аполлон» и др.

6.3. В 1993—1995 гг. в СКТБ ФТИНТ начало складываться новое научное направление — технология производства в Космосе материалов с улучшенными свойствами. Фундаментом для развития этого направления служит многолетний опыт в создании бортовой аппаратуры и экспериментальных установок для космических исследований. Был разработан и изготовлен автоматический биологический анализатор «БИАН» в составе комплекса научной аппаратуры для изучения планеты Марс. «БИАН» предназначался для забора проб грунта и его анализа по 6 тестам с целью поиска признаков жизни на Марсе на микробиологическом уровне.

Научные основы ряда процессов космической технологии составляют теплообмен и гидродинамика в жидкой фазе и в газожидкостных системах в условиях микрогравитации. В ФТИНТ выполнены экспериментальные и теоретические исследования образования и устойчивости поверхности раздела фаз, возникновения и развития конвекции в жидкости, кипения жидкостей в невесомости (Веркин и др., 1988). Применительно к этим процессам разработаны и реализованы методы лабораторной имитации условий микрогравитации. Разработаны оригинальные методики выращивания монокристаллов многокомпонентных Fe-Cr-Ni, Fe-Ni и других сплавов.

В настоящее время основные усилия в этой области сосредоточены на создании технологий и бортовой аппаратуры для производства в условиях микрогравитации высокосовершенных монокристаллов многокомпонентных полупроводников типа  $A_{II} - B_{VI}$ , используемых в качестве приемников ИК-излучения, а также для получения сверхчистых биологически активных веществ и популяций организмов — продуцентов методами проточного электрофореза. Технологические установки предполагается оснастить оптическими системами визуализации и контроля физических параметров процессов в рабочем объеме.

Разработанные технологии и установки предназначены для использования на борту технологических космических аппаратов отечественного («Сузір'я») и зарубежного («Шаттл», «Альфа») производства. Предусматривается возможность использования наземных вариантов технологического оборудования в народнохозяйственных отраслях биотехнологии, фармацевтики, полупроводниковой техники.

К настоящему времени создан комплекс оборудования для лабораторной отработки технологий получения высококачественных модельных и реальных материалов и проведения физических экспериментов в условиях имитации микрогравитации. Работы по космическим технологиям проводятся в коoperation с КБ «Южное», Светловодским заводом чистых металлов, Государственным научным центром лекарственных средств, Центром биотехнологий. Совместно с Институтом ботаники НАН Украины (лаб. Е. Л. Кордюм) начаты оригинальные исследования компенсаторных возможностей магнитного и электрического полей при воздействии на находящиеся в невесомости биологические объекты (Н. И. Богатина, С. И. Бондаренко).

В заключение отметим, что при подготовке статьи были использованы материалы, представленные руководителями направлений и разработчиками проектов по рассматриваемой тематике. Всем им авторы благодарны за содействие и помощь, в особенности В. Т. Архипову, Г. Д. Гамуле, В. Ф. Гетманцу, В. А. Коноводченко, Ю. А. Меленевскому, В. М. Науменко, А. П. Пилипенко, Ю. А. Похилу, А. И. Церковному.

- Архипов В. Т., Дубровина Е. Н., Исхаков Ю. Ф. Некоторые особенности расчета термоаккумуляторов плавления // Тепло- и массообмен в криогенной технике. — Киев: Наук. думка, 1990.—С. 80—97.
- Бабенко Ф. М., Багров Н. Н., Бондаренко В. И. и др. Криогенно-вакуумные системы // Криогенная техника. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 105—131.
- Багров Н. Н., Фурманский А. Г., Гусляков А. А. Радиочастотный однопольный масс-спектрометр // Приборы и техн. эксперимента.—1969, № 4.—С. 136—138.
- Багров Н. Н., Веркин Б. И., Пилипенко А. П. и др. Ракетная аппаратура для изучения состава мезосфера и нижней термосферы // Тр. Центр. аэрол. обсерватории.—1977.—Вып. 127.—С. 15—19.
- Басенко А. В., Кислов А. М., Кладов Г. К. и др. Тепловое проектирование криогенного астрономического ИК-телескопа // Тепло- и массообмен в криогенной технике. — Киев: Наук. думка, 1990.—С. 109—115.
- Басс В. П., Бразинский В. И., Пилипенко А. П. и др. Постановка и реализация натурного эксперимента по исследованию процессов массопереноса в окрестностях ИСЗ серии «Космос» // Механика жидкостей и газа: Докл. Междунар. школы-семинара. — М.: ЦАГИ, 1994.—Ч. 5.—С. 8.1—8.17.
- Беляева А. И., Сиренко В. А. Криогенные многослойные покрытия. — Киев: Наук. думка, 1991.—280 с.

- Беляева А. И., Гребенник Т. Г., Погорелова С. А. и др. Система охлаждения криогенных ситалловых зеркал // Оптич. журн.—1992.—№ 1.—С. 45—50.
- Беляева А. И., Камышова И. В., Погорелова С. А. и др. Проблемы создания эффективной системы теплоотвода от криозеркал из кремния // Оптич. журн.—1994.—№ 2.—С. 23—29.
- Бондаренко С. И., Шерemet В. И. Применение сверхпроводимости в магнитных измерениях. — Л.: Энергоатомиздат, 1982.—132 с.
- Бондаренко С. И., Иванов Н. И., Коноводченко В. А. и др. Криогенная электроника и радиофизика // Криогенная техника. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 74—88.
- Веркин Б. И., Багров Н. Н., Кулик и др. Физические основы моделирования вакуумных условий космического пространства // Модель космоса. — М: Изд-во МГУ, 1968а.—Т. 2.—С. 42—75.
- Веркин Б. И., Янов А. Е., Бондаренко В. И. и др. Имитационные исследовательско-испытательные установки с криогенными насосами // Модель космоса. — М: Изд-во МГУ, 1968б.—Т. 2.—С. 326—357.
- Веркин Б. И., Верховцева Э. Т., Фогель Я. М. Газоструйный источник вакуумного ультрафиолетового излучения // Физика вакуумного ультрафиолетового излучения. — Киев: Наук. думка, 1974.—С. 38—58.
- Веркин Б. И., Михальченко Р. С., Архипов В. Т. и др. Опыт разработки бортовых сублимационных аккумуляторов холода // Техника низких температур. — Киев: Наук. думка, 1979.—С. 3—21.
- Веркин Б. И., Гетманец В. Ф., Михальченко Р. С. Теплофизика низкотемпературного сублимационного охлаждения. — Киев: Наук. думка, 1980.—232 с.
- Веркин Б. И., Кириченко Ю. А., Михальченко Р. С., Гетманец В. Ф. Тепло- и массообмен в криогенных системах // Криогенная техника. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 7—47.
- Веркин Б. И., Кириченко Ю. А., Русанов К. В. Теплообмен при кипении в полях массовых сил различной интенсивности. — Киев: Наук. думка, 1988.—256 с.
- Гамуля Г. Д., Добропольская Г. В., Островская Е. Л. и др. Влияние ступенчатого нагружения на работоспособность конструкционных материалов в вакууме // Космич. исследования на Украине.—1981.—Вып. 15.—С. 28—34.
- Гетманец В. Ф., Михальченко Р. С. Основы расчета и проектирования криогенных систем терmostатирования // Исследование процессов в криогенной и вакуумной технике. — Киев: Наук. думка, 1982.—С. 3—36.
- Гринберг Н. М. Физическая трактовка механических критериев циклической трещиностойкости и влияния на них низкой температуры // Проблемы прочности.—1988.—№ 11.—С. 23—26.
- Житомирский И. С., Кислов А. М. Интегральные уравнения для аддитивных функционалов на марковских процессах и их использование в теории молекулярного и лучистого переноса // Теплообмен V. — Минск: ИТМО АН БССР, 1976.—Т. 8.—С. 17—24.
- Калашник Л. И., Кислов А. М., Лившиц Э. М. Расчет параметров криогенных вакуумных камер методом Монте-Карло // Инж.-физ. журн.—1967.—13, № 6.—С. 904—913.
- Кислов А. М., Галимов С. Р., Ястржембский А. Л. Об эффективности космического радиатора в бортовых системах криостатирования с аккумулятором холода // Космич. исследования.—1979.—17, вып. 3.—С. 449—456.
- Кислов А. М., Романенко В. Г. Применение метода Монте-Карло для расчета молекулярных и лучистых потоков в системах сложной конфигурации. — Харьков, 1980.—36 с.—

- (Препринт / АН УССР. ФТИНТ; № 80—12).
- Кислов А. М., Плетнев Ф. М., Пухнавцева Г. В. Численное моделирование процесса охлаждения криогенного объекта // Металлооптика-89: Тр. Всесоюз. конф. — М., 1990.— Т. 2.—С. 307—312.
- Коноводченко В. А., Лобанов К. Б., Силкин Н. В. и др. Метрологический комплекс для измерения параметров глубокоохлаждаемых ИК фотоприемников в низкофоновых условиях // Тепловые приемники излучения. — Санкт-Петербург: ВНИЦ «ГОИ им. Вавилова», 1992а.—С. 107—108.
- Коноводченко В. А., Меленевский Ю. А., Крухмалев Н. И. Сверхпроводниковые болометры для температур менее 1К // Низкотемпературные процессы и системы. — Киев: Наук. думка, 1987.—С. 3—8.
- Коноводченко В. А., Меленевский Ю. А., Гришин Е. А и др. Быстро действующий ИК-спектрофотометр для наземного телескопа // Тепловые приемники излучения. — Санкт-Петербург: ВНИЦ «ГОИ им. Вавилова», 1992б.—С. 77—78.
- Коноводченко В. А., Шумилов Ю. П., Наджип А. Э. и др. ИК-фотометр для астрофизических исследований // Тепловые приемники излучения. — Санкт-Петербург: ВНИЦ «ГОИ им. Вавилова», 1992в.—С. 79—80.
- Лаврентьев Ф. Ф. (ред.) Прикладное криогенное и вакуумное материаловедение. — Киев: Наук. думка, 1991.—152 с.
- Лебедева И. Л., Островская Е. Л., Юхно Т. Р. и др. Вторичные структуры при трении в вакууме: общие свойства и закономерности формирования для различных конструкционных материалов // Трение и износ.—1989.—10, № 4.—С. 723—736.
- Любарский И. М., Палатник Л. С. Металлофизика трения. — М.: Металлургия, 1976.—176 с.
- Маркус А. М., Удовенко В. Ф., Зиновьев М. В. и др. Ускоритель тяжелых ионов на энергию 200 кэВ для работ по физике твердого тела // Приборы и техн. эксперимента.—1980.— № 4.—С. 22—24.
- Михальченко Р. С., Вакуленко В. Д., Архипов В. Т. и др. Двухкомпонентный сублимационный аккумулятор холода КТ-12 // Техника низких температур. — Киев: Наук. думка, 1979.—С. 22—30.
- Михальченко Р. С., Архипов В. Т., Вакуленко В. Д. и др. Исследование работы дроссельной микрокриогенной системы совместно с аккумулятором холода // Тепловые процессы в криогенных системах. — Киев: Наук. думка, 1986.— С. 100—106.
- Плетнев Ф. М., Пухнавцева Г. В., Ястржембский А. Л. Методика теплового расчета криогенных инфракрасных телескопов. — Харьков, 1988.—22 с.—(Препринт / АН УССР. ФТИНТ; № 2—88).
- Сурков Ю. А., Иванова В. Ф., Веркин Б. И. и др. Масс-спектральные исследования химического состава атмосферы Венеры на АМС «Венера-9» и «Венера-10» // Геохимия.—1978.—№ 4.—С. 506—513.
- Gamulya G. D., Ostrovskaya Ye. L., et al. Friction behaviour and wear resistance of diamond-like carbon films under cryogenic temperatures // Diamond and Related Materials.—1994.—3.—P. 1381—1384.
- Gamulya G. D., Lebedeva I. L., Vvedensky Yu. V. et al. Secondary structure formation and wear mechanisms for solid lubricant coatings under friction in vacuum // Wear.—1994.—171.—P. 143—148.
- Ilichev V. Ya., Popov V. P., Skibina L. V. et al. Temperature dependence of the linear expansion coefficients of some Fe-Cr-Ni alloys in the temperature range 4,2 to 300 K // Cryogenics.—1978.—18, N 2.—P. 90—92.
- Ilichev V. Ya., Skibina L. V., Chernik M. M. The influence of martensitic transformation on strength and plasticity of Fe-Cr-Ni alloy single crystals // Austenitic Steels at Low Temperatures / Ed. by R. P. Reed. — New York: Plenum Press, 1983.—P. 69—82.
- Kislov A. M., Salenkov V. Yu., Yastrzembsky A. L. Efficiency of space radiators for cooling shields in cryostat insulation // Proc. ICEC-10, Helsinki, 1984.— Butterworth, 1984.—P. 522—524.
- Lavrentev F. F., Pokhil Yu. A., et al. Effect of low temperature thermocycling on the structure and stressstrain curve parameters of a Ti-Al alloys at 4,2 K // Cryogenics.—1983.—23, N 3.—P. 170—174.
- Lavrentev F. F., Pokhil Yu. A., et al. Fracture micromechanisms and plasticity of Fe-Cr-Ni-Ti alloys in the temperature range of 77 to 4,2 K // Mater. Sci. and Eng.—1992.—158A.—P. 157—166.
- Mikhalkchenko R. S., Arkhipov V. T., Ostrovskii I. N., et al. A study of solidification of liquid cryogens in cryostats // Физика низких температур.—1990.—16, № 4.—С. 476—480.
- Pletnyov F. M., Stepanova M. V., Yastrzhembskii A. L. Analysis of superfluid helium nonventing storage schemes in cryogenic system of space infrared telescope // Физика низких темпер.—1990.—16, № 4.—С. 482—484.
- Shablo A. A., Bondarenko S. I., Timofeev V. P., et al. HTSC thick-film flux transformers // Cryogenics.—1994.—34 ICEC Suppl.—P. 907—909.
- Verkin B. I., Getmanez V. F., Mikhalkchenko R. S. Termophysics of new phenomena of gradientless heat transfer in porous solid cryogen // Cryogenics.—1979.—19, N 1.—P. 17—26.
- Verkin B. I., Melenovsky Yu. A., Kharchenko I. F., Konovodchenko V. A. Fast-response superconducting bolometer // Proc. ICEC-8, Genova, 1980.—Guildford, 1980.—P. 539—543.