

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.384.62

**РЕЗУЛЬТАТЫ КОСМИЧЕСКОГО ИСПЫТАНИЯ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ДЧ-01 ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕГРАДАЦИИ МАТЕРИАЛОВ И
РАДИОЭЛЕМЕНТОВ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

©2026 г. К. Е. Воронов, М. П. Калаев, А. М. Телегин*

Самарский национальный исследовательский университет

им. академика С.П. Королева

Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

**E-mail: talex85@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.04.2026

После доработки 09.06.2026

Принята к публикации 06.07.2026

Приводится описание научной аппаратуры (ДЧ-01), предназначенной для экспериментального изучения деградации образцов поверхностных элементов космического аппарата, а также представлены результаты летного эксперимента по изменению спектральной прозрачности кварцевого стекла в процессе шестилетнего экспонирования на орбите.

Ключевые слова: космический аппарат, деградация, научная аппаратура, прозрачность стекла, кварцевые микровесы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшую роль в обеспечении длительной безотказной работы космического аппарата (КА) играет стойкость его конструкционных материалов и элементов бортового оборудования к воздействию окружающей космической среды. На КА в полете воздействует обширный комплекс факторов космического пространства (ФКП): потоки электронов и ионов высокой энергии, холодная и горячая космическая плазма, солнечное электромагнитное излучение, метеорная материя, твердые частицы искусственного происхождения и другие факторы [1–13]. В результате такого воздействия в материалах и элементах бортового оборудования КА протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их эксплуатационных параметров. В зависимости от характера процессов, инициируемых воздействием космической среды, происходящие

изменения свойств материалов и элементов оборудования могут иметь разный временной масштаб, быть обратимыми или необратимыми, представлять различную опасность для бортовых систем. Для оценки воздействия ФКП на различные материалы проводятся лабораторные испытания с использованием имитаторов различных типов, однако часто по результатам этих экспериментов можно лишь косвенно судить о деградации элементов в условиях космической среды вследствие сложности воспроизводства совокупности реальных характеристик воздействующих потоков и проведения ускоренных испытаний. Существенное влияние на некоторые элементы конструкции оказывает практически не моделируемая в лабораторных условиях собственная внешняя атмосфера (СВА) КА.

Факторы, определяющие СВА, делятся на импульсные и непрерывные [8, 14].

Непрерывные факторы, действующие на протяжении всего срока службы КА, обуславливают монотонный циклический характер вариаций параметров СВА. К непрерывным факторам следует отнести:

- возмущение плотности остаточной атмосферы космического пространства, вызвано поступательным движением КА в этом пространстве;
- газовыделение конструкционных материалов наружных элементов конструкций КА;
- газовыделение из герметизированных отсеков КА.

Импульсные факторы действуют весьма непродолжительное время по отношению к общему сроку службы КА, и их проявление носит дискретный характер. К импульсным источникам следует отнести:

- продукты сгорания двигательных установок;
- выбросы топлива двигательных установок, появляющиеся в результате продувок топливных магистралей;
- продукты термического испарения конструкционных материалов двигательных установок;
- продукты срабатывания пиротехнических устройств;
- прочие выбросы различных компонентов жизнедеятельности КА;
- локальные выбросы масс, обусловленные взаимодействием метеоритных потоков с поверхностью КА [15–18].

В ряде случаев параметры собственная внешняя атмосфера в основном определяются импульсными источниками газовыделения благодаря значительному объему продуктов газовыделения последних. Однако при оценке повреждающего воздействия СВА роль различных источников газовыделения может радикальным образом измениться в ту или иную сторону в зависимости от конкретного механизма деградации элементов конструкции КА.

Более того, повреждающее воздействие мощных источников газовой выделенности может оказаться весьма незначительным ввиду ограниченности парциального состава и малой химической активности газовых компонент. Могут наблюдаться явления обратного характера, например, весьма малые концентрации атомарного кислорода атмосферы космического пространства могут оказать существенное повреждающее воздействие благодаря как своей высокой химической активности, так и значительной скорости поступательного движения КА.

В условиях космического пространства исследования деградации параметров материалов проводились неоднократно [4], однако представляет интерес проведение аналогичных экспериментов на орбитах Земли с различными наклонениями и высотами. При этом исследования поведения материалов в условиях воздействия ФКП носили, в основном, характер экспонирования с последующим возвращением на Землю и исследованием в лабораторных условиях, что неизбежно приводило к искажениям результатов.

По этой причине использование прямых методов измерения изменений характеристик элементов и параметров систем космического аппарата в ходе проведения натурных экспериментов, а также оценка влияния ФКП на их функционирование являются уникальными возможностями для получения достоверного результата.

Для исследования показателей деградации элементов и материалов в условиях орбитального полета была создана научная аппаратура ДЧ-01, включающая в себя исследуемые образцы и средства контроля изменения их свойств. Аппаратура ДЧ-01 была установлена на малый космический аппарат “АИСТ-2Д” (рис. 1) [19].

Рис. 1. Внешний вид малого КА “АИСТ-2Д” [19]

Малый КА “АИСТ-2Д” был запущен в апреле 2016 года, и эксперименты на его борту продолжаются до сих пор.

Характеристики орбиты малого КА следующие:

- наклонение 97.272° ;
- период обращения $94.243'$;
- апоцентр 493.9 км;
- перигей 477.2 км.

Длительность активной фазы проведения эксперимента ДЧ-01 на орбите Земли превысила 2000 дней, что существенно превзошло трехлетний запланированный срок. Первое включение аппаратуры на борту АИСТ-2Д произошло 11 июня 2016 года, последнее включение произошло 4 марта 2022 года.

2. ОПИСАНИЕ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДЧ-01

Научная аппаратура ДЧ-01 (рис. 2) представляет собой автоматизированную бортовую мини-лабораторию, позволяющую непосредственно в ходе летного эксперимента контролировать изменения характеристик материалов и электронных компонентов при воздействии факторов космического пространства. Аппаратура ДЧ-01 была разработана и изготовлена сотрудниками института космического приборостроения Самарского университета [19, 20].

У проекта были следующие задачи:

- разработка аппаратуры для научных и образовательных целей с использованием электронной компонентной базы класса industrial;
- объединение нескольких научных инструментов в одном корпусе с целью снижения массогабаритных показателей и стоимости всего комплекса в целом;
- отработка методики проведения экспериментов на борту космического аппарата, а также получения данных, имеющих научное, прикладное и образовательное назначение.

Интеграция нескольких научных инструментов в один корпус позволяет объединить часть систем, таких как система вторичного электропитания, командно-управляющая система и система связи с бортовой информационной шиной. С этой целью использованы два командно-телеметрических модуля, которые работают параллельно, но в случае необходимости могут резервировать большую часть функций друг друга.

Рис. 2. Фотография наземного образца аппаратуры ДЧ-01

Научная аппаратура выполнена в виде моноблока, который включает в себя образцы исследуемых материалов и контролирующие их датчики.

В состав научной аппаратуры входят три независимых модуля:

- ДЧ-Оптика – модуль для исследования изменения характеристик прозрачных оптических элементов;
- ДЧ-ЭРИ – модуль для исследования работоспособности электронных компонентов (образцы интегральных микросхем, выполненных по различным технологическим нормам)
- ДЧ-Кварц – модуль для исследования уноса массы полимерных покрытий с поверхности образцов.

Кроме научных инструментов, аппаратура включает в себя два модуля управления и сбора данных, которые работают параллельно и в случае необходимости могут резервировать большую часть функций друг друга.

Обобщенная структурная схема аппаратуры ДЧ-01 приведена на рис. 3.

Рис. 3. Структурная схема аппаратуры ДЧ...

3. МОДУЛЬ ДЧ-ОПТИКА

Модуль ДЧ-Оптика служит для исследования показателей деградации открытых оптических элементов (рис. 4). Модуль оптических измерений содержит диск с прозрачными образцами 9, на фиксированном расстоянии установлены фотоприемники 7, механически диск соединен с шаговым двигателем 10, выход фотоприемника соединен со входом блока управления сбора данных 1, с противоположной стороны диска установлены источники света 6, включающие в себя светодиоды трех цветов и полупроводниковый лазер.

Рис. 4. Структурная схема модуля ДЧ-Оптика

ДЧ-01 измеряет изменение коэффициент спектрального пропускания $\Delta T(\lambda)$ для разных длин волн более чем в 20 точках каждого образца с чувствительностью не хуже 0.01% и изменение индикатрисы рассеяния лазерного луча на дефектах стекла в восьми точках в диапазоне углов 10–30°.

Оптическая схема модуля оптических измерений приведена на рис. 5. Лазерный пучок проходит через прозрачный образец с дефектами и попадает в ловушку 6. При этом рассеянное на оптических дефектах излучение 7 принимается с помощью линейной ПЗС-матрицы 5. Для измерения коэффициента прозрачности используются светодиоды 8 и фотодиоды 9. Путем вращения и последовательного перемещения держателя образцов можно обеспечить полное сканирование поверхности каждого образца.

Рис. 5. Оптическая схема аппаратуры

С помощью последующей наземной обработки данных телеметрии проводилась оценка размера и количества микро-кратеров на поверхности, а также толщин пленок, осажденных на поверхности стекла. В поворотном диске-держателе имеется шесть окон для образцов диаметром 20 мм и толщиной 1 мм, при этом в пять окон установлены кварцевые стекла КУ-2, а одно окно оставлено пустым для калибровки оптической схемы. В зависимости от места расположения образцов на диске относительно внешнего окна, обращенного в космическое пространство, наблюдаются различные значения степени изменения их характеристик. На рис. 6 показано изменение спектральной прозрачности для стекла, находящегося при экспонировании в середине окна и получившего наибольшее воздействие ФКП.

Рис. 6. Изменение спектральной прозрачности стекла

Согласно данным, представленным на рис. 6, в первые дни эксперимента наблюдается увеличение прозрачности стекла, вызванное дегазацией с поверхности образцов. Далее

наблюдается снижение прозрачности, которое предположительно вызвано осаждением компонентов собственной внешней атмосферы космического аппарата, а также радиационным окрашиванием стекол. Изменение максимально в синей области спектра (кривая 3). На графиках пропускания в зеленой (кривая 2) и синей (кривая 3) областях спектра можно заметить два локальных участка, соответствующих временному повышению прозрачности на фоне общего спадающего тренда. Наличие данных участков является предметом отдельного исследования, и на данный момент однозначного объяснения нет. Проводились оценки возможного влияния температуры, деградации источников оптического излучения и засветки на результаты оптических измерений, корреляций не выявлено. При этом относительная величина локальных нелинейных участков находится в пределах заявленной точности прибора 0.5%.

Кроме этого, дополнительный вклад в изменение прозрачности образцов вносят металлические сетки над окнами в приборе (см. рис. 2), поскольку их распыление под действием космической плазмы может приводить к осаждению тонких пленок, в том числе на исследуемые образцы. Полный отказ от сетки невозможен ввиду необходимости защиты электроники от электростатических разрядов, поэтому в последующих экспериментах планируется оптимизация конструкции сетки с целью повышения коэффициента прозрачности, а также подбор ее материала для уменьшения распыления микрочастиц.

Проведенный анализ индикатрис рассеяния не позволил обнаружить кратеры от удара высокоскоростных частиц на поверхности стекла. С одной стороны, это обусловлено их небольшим количеством на указанной орбите и малой площадью стекла, с другой стороны – относительно малым количеством точек сканирования каждого образца (20 точек). На основе обработки телеметрической информации, полученной с борта космического аппарата, и с целью повышения достоверности полученных данных, еще до завершения летного эксперимента был разработан и предложен прототип научной аппаратуры, анализирующий поверхность стекла диаметром 30 мм более чем в 1600 точках, что существенно повышает вероятность обнаружения кратеров [21–23].

4. МОДУЛЬ ДЧ-КВАРЦ

Атомарный кислород является доминирующим компонентом атмосферы Земли на высотах 200–700 км. Столкновения атомов кислорода с внешними поверхностями КА,двигающихся по орбите со скоростью порядка 8 км/с, приводят к соударению, эквивалентному энергии 5 эВ и потоку 10^{14} – 10^{15} атом/(см²·с). Эрозия полимеров при воздействии атомарного кислорода приводит к уменьшению толщины материалов, уносу массы, а также изменению физико-химических свойств материалов.

В данном эксперименте исследовался унос массы полиамидного покрытия. В устройстве используется универсальный частотный метод, отличающийся простотой устройства и эксплуатации преобразователя (кварцевые микровесы). В качестве преобразователя используется кварцевый элемент, включенный в контур генератора частоты. Принцип действия кварцевого преобразователя основан на зависимости частоты генерируемых сигналов от изменения массы материала, нанесенного на кварцевую пластину. Структурная схема кварцевых весов приведена на рис. 7.

Рис. 7. Структурная схема кварцевых весов

Регистрирующий кристалл (РК) принимает на себя поток частиц, поэтому масса его покрытия становится меньше, в то время как контрольный кристалл (КК) изолирован от воздействия окружающей среды. Каждый кристалл имеет свой собственный генератор (генератор регистрирующего кристалла – ГРК, генератор контрольного кристалла – ГКК). С выходов генераторов сигналы поступают на смеситель (СМ), на выходе которого выделяется разностная частота. Поскольку контрольный кристалл изолирован от окружающей среды, изменение частоты сигнала на выходе смесителя может быть вызвано исключительно изменением массы материала на регистрирующем кристалле. Частота сигнала от смесителя лежит в килогерцевом диапазоне. Применение контрольного кристалла и смесителя минимизирует влияние температурных изменений. Разностная частота с выхода частотного дискриминатора поступает на счетный вход модуля контроллера.

Зависимость частоты круглого кварцевого резонатора вместе с нанесенным на пластину веществом (рассматривается случай равномерного распределения вещества по кварцевому резонатору) количественно выражается через уравнение Зауэрбрея [24]:

$$\Delta f = -\frac{2f_0^2}{B\sqrt{\rho_q\mu_q}}\Delta h\rho_m\pi r^2, \quad (1)$$

где Δf [МГц] – изменение частоты, f_0 [МГц] – резонансная частота, Δh [см] – изменение толщины исследуемого материала, B [см²] – площадь активной колебательной зоны, μ_q [Г/(см·с²)] – модуль сдвига кварца, ρ_q [г/см³] – плотность кварца, ρ_m [м] – плотность материала, r [см] – радиус кварцевой пластины.

Устройство содержит шесть пар кварцевых платин, подключенных к модулю микроконтроллера через мультиплексор. Это позволяет производить экспонирование и испытания 6 различных покрытий.

В качестве кварцевых пластин были использованы кристаллы для кварцевых микровесов eQSM-10М с номинальной частотой 10 МГц и диаметром 14 мм. Толщина полиамидного покрытия составила 10 мкм (рис. 8).

Рис. 8. Чистый кварцевый кристалл (слева) и кварцевый кристалл с исследуемым покрытием (справа)

Результаты летного эксперимента для одного из каналов приведены на рис. 9. Изменение разностной частоты на графике пересчитано по изменению толщины покрытия по формуле (1).

Рис. 9. Изменение толщины покрытия, рассчитанное по изменению частоты

Анализ данных пяти каналов кварцевых весов позволил зарегистрировать систематический унос массы полиамида в течение всего времени данного эксперимента (120 дней). При этом изменение толщины покрытия оказалось меньше ожидаемого, что связано, с одной стороны, с введением модификатора в полиамид, а с другой – с частичным затенением кварцевых весов корпусом прибора и защитной сеткой.

Температура внутри аппаратуры на всем протяжении эксперимента приведена на рис. 10. На графике, показанном на рис. 10, видно, что температура на протяжении всех включений находилась в интервале от $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, что можно считать относительно стабильными условиями для работы кварцевых весов.

Рис. 10. Циклограмма изменения температуры внутри аппаратуры

Для дальнейших модификаций прибора предложены другие конструкция и размещение чувствительных элементов кварцевых весов [25].

5. МОДУЛЬ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭРИ

В корпусе аппаратуры помещены две платы с исследуемыми контролируемыми электрорадиоэлементами. В качестве элементов были выбраны микросхемы флеш-памяти с различными интерфейсами (параллельного и последовательного типа), а также несколько типов микроконтроллеров, имеющих в своем составе флеш-память программ. Структурная схема модуля показана на рис. 11. Средства аппаратуры предоставляют расширенный набор интерфейсов 10, а также коммутатор питания 9, позволяющий измерять ток потребления каждой микросхемы и отключать их от питания при существенном росте тока потребления. Кроме этого, имеется возможность переключать информационные шины последовательных интерфейсов UART, SPI, I2C, что позволяет избежать блокирование этих шин при выходе из строя выходных буферов отдельных микросхем. Для контролируемых микросхем 1–4 с параллельной шиной такая возможность не предусмотрена вследствие сложности коммутации параллельных шин с большим количеством линий (32 линии).

Рис. 11. Структурная схема аппаратуры ЭРИ-ТЕСТ

С тестируемыми микросхемами ведется информационный обмен в запросно-ответном режиме. В случае искажения или потери данных на любом из элементов этот факт

фиксируется и передается в канал телеметрии с указанием номера микросхемы, типа ошибки (искажение данных / отсутствие ответа), номера и содержимого сбойной ячейки. При проведении тестов памяти используются поочередная запись и считывание прямого и инверсного кодов. При проведении испытаний микроконтроллеров используются тестовые программы, предварительно загруженные в их память [26].

Для микросхем памяти аппаратура позволяет выявить:

- искажение или потерю данных, записанных во FLASH-, RAM- или ROM-память;
- залипание ячейки памяти при повторной перезаписи,
- полный отказ элементов,
- изменение потребления тока ИМС,
- превышение потребления тока свыше критического с аварийным отключением сбойной ИМС.

Для микроконтроллеров аппаратура позволяет выявить:

- сбой памяти программ (не вызвавший отказ тестовой программы),
- отказ универсальных портов ввода вывода, блоков периферии (USART, I2C, SPI, ADC, DAC и т.д.),
- полный отказ элементов,
- изменение потребления тока ИМС,
- превышение потребления тока свыше критического с аварийным отключением сбойной ИМС.

За время проведения эксперимента ошибок и сбоев в работе флеш-памяти и микроконтроллеров не выявлено, что подтверждает возможность построения аппаратуры для научных и образовательных целей на относительно доступной и дешевой компонентной базе класса industrial. Однако следует отметить, что в описанном эксперименте из-за ограничений по энергетике модуль ЭКБ работал в облегченном режиме – микросхемы включались на 80 минут с промежутками между включениями 3–5 дней, что в соответствии с теорией существенно снижает накопление дозовых эффектов и вероятность воздействия тяжелых заряженных частиц в указанный момент времени.

За время проведения эксперимента ошибок и сбоев в работе флеш-памяти и микроконтроллеров не выявлено. Однако следует отметить, что в описанном эксперименте из-за ограничений по энергетике модуль ЭКБ работал в облегченном режиме – микросхемы включались на 80 минут с промежутками между включениями 3–5 дней, что в соответствии с теорией существенно снижает накопление дозовых эффектов и вероятность воздействия ТЗЧ в указанный момент времени. В последующих версиях аппаратуры целесообразно

обеспечить непрерывную работу тестируемых ЭРИ, при этом контролирующая аппаратура в период между опросами может отключаться, либо переходить в энергосберегающий режим.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За все время работы научной аппаратуры было проведено 986 циклов измерений, получено 114 Мегабайт телеметрической информации с результатами измерений с космического аппарата. Суммарная длительность эксперимента превысила 2000 дней, что оказалось существенно больше расчетного срока службы аппаратуры. Эксперимент продемонстрировал эффективность объединения нескольких научных инструментов в одном корпусе, а также позволил получить ряд экспериментальных данных, имеющих практическое значение. Вместе с этим обработка результатов эксперимента выявила и некоторые недостатки: металлическая сетка в окнах над образцами, предназначенная для защиты аппаратуры от электростатических разрядов, вносит погрешности в результаты экспериментов по уносу массы покрытий и изменению прозрачности стекол. С целью повышения точности экспериментов целесообразно изменить способ защиты электроники и тестируемых образцов от электризации аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новиков Л.С.* Космическое материаловедение. Учебное пособие. / М.: Макс Пресс, 2014.
2. *Sergeev V.P., Kalashnikov M.P., Sergeev O.V. et al.* J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1799. P. 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1799/1/012028>
3. *Новиков Л.С.* Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. Москва: Университетская книга, 2009.
4. *Lamb D.A., Irvine S-j.C., Baker M.A., Underwood C.I., Mardhani S.* Prog. Photovolt. 2021. V. 29 P. 1000. <https://doi.org/10.1002/pip.3423>
5. *Душин В.К., Крылов А.Н., Скороваров А.Ю.* Космическая техника и технологии. 2021. № 2(33). С. 98. <https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2021-2-98-106>
6. *Акишин А.И., Новиков Л.С.* Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. Москва: Знание, 1983.
7. *Акишин А.И., Дунаев Н.М., Константинова В.В.* Собственная атмосфера космических аппаратов и ее влияние на бортовые приборы и технологию в космосе. Космическое материаловедение и технология. Москва: Наука, 1977. С. 65.
8. *Надирадзе А.Б.* Инженерная модель для оценки загрязнения поверхности космического аппарата выхлопами ЖРД малой тяги. Матем. моделирование. 2001. Т. 13. № 7. С. 56. <https://www.mathnet.ru/rus/mm751>

9. *Надирадзе А.Б., Смирнов В.А., Максимов И.А., Хартов В.В., Тибильдеева В.В.* Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2006. № 1 (8). С. 91.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=9169660>
10. *Надирадзе А.Б., Калаев М.П., Семкин Н.Д.* Космические исследования. 2016. Т. 54. № 5. С. 392. <https://doi.org/10.7868/S002342061605006X>
[*Nadiradze A.B., Kalaev M.P., Semkin N.D.* Cosmic Research. 2016. V. 54. № 5. P. 366.]
11. *Soares C.E., Barsamian H., Rauer S.* Proc. SPIE 4774. 2002. <https://doi.org/10.1117/12.481653>
12. *Калаев М.П., Родина А.В., Телегин А.М.* ПТЭ. 2022. № 6. С. 99.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222050251>
13. *Воронов К.Е., Телегин А.М., Пияков А.В., Рязанов Д.М.* Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 1. С. 3. <https://elibrary.ru/item.asp?id=42534226>
14. *Семкин Н.Д.* Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях. Под ред. Воронова К.Е., Новикова Л.С. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева. 2005.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=19448486>
15. *Schonberg W.P.* Int. J. Impact Eng. 2001. Т. 26. №. 1–10. С. 713.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=1237192>
16. *Семкин Н.Д., Балакин В.Л., Белоконов И.В., Воронов К.Е.* Вестник Самарского университета. 2007. № 1(12). С. 53. <https://elibrary.ru/item.asp?id=10292918>
17. *Лоцманов А.В., Онучин Е.С., Фельдштейн В.А.* Космонавтика и ракетостроение. 2020. № 6(117). С. 79. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44589740>
18. *Надирадзе А.Б., Смирнов В.А.* Вестник МАИ. 2014. Т. 21. № 3. С. 80.
19. Опытнo-технологический малый космический аппарат "АИСТ-2Д". Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017.
20. *Ткаченко И.С., Иванушкин М.А., Кауров И.В., Волгин С.С., Крестина А.В.* Научно-образовательный комплекс малых космических аппаратов серии "АИСТ". Результаты пятилетней работы. XLV Академические чтения по космонавтике. Т. 3. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. С. 314. <https://elibrary.ru/item.asp?id=47267272>
21. *Semkin N., Novikov L., Kalaev M.* Degradation of Optical Elements of Spacecraft Under the Impact of High-Velocity Particles. Protection of Materials and Structures from the Space Environment. Berlin Heidelberg: Springer, 2012. P. 513.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-30229-9_47
22. *Семкин Н.Д., Калаев М.П., Воронов К.Е.* ПТЭ. 2011. № 3. С. 143.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=16455618>

23. *Калаев М.П., Телегин А.М., Воронов К.Е., Лисян Ц., Цзилун Ц.* Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 5. С. 803. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-5-803-809> .
24. *Калаев М.П., Рязанов Д.М.* Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 2. С. 44. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22155452>
25. *Ионов А.В., Рязанов Д.М.* Всероссийская научно-техническая конференция “Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций”. Самара: Самарский университет, 2020. С. 174. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44080367>
26. *Семкин Н.Д., Плехотниченко П.Г., Ильин А.Б., Калаев М.П., Рязанов Д.М., Помельников Р.А.* Вестник Самарского университета. 2015. Т. 14. № 1. С. 58. <https://doi.org/10.18287/1998-6629-2015-14-1-58-72> .

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Внешний вид малого КА “АИСТ-2Д” [19]
- Рис. 2.** Фотография наземного образца аппаратуры ДЧ-01
- Рис. 3.** Структурная схема аппаратуры ДЧ: 1 – модуль ДЧ-Кварц; 2, 3 – модули ДЧ-ЭРИ; 4, 5 – модули управления и сбора данных; 6 – модуль оптических измерений; 7 – массовая защита от ионизирующих излучений; 8 – подключение к космическому аппарату
- Рис. 4.** Структурная схема модуля ДЧ-Оптика: 1 – модуль управления и сбора данных, 2 – датчик положения образцов; 3 – усилители а АЦП; 4 – драйвер связи с КПА; 5 – контроллер информационного обмена; 6 – источники света; 7 – фотоприемники; 8 – цифровая гальваническая развязка; 9 – диск с образцами; 10 – шаговый двигатель; 11 – контроллер двигателя; 12 – преобразователь напряжений питания; 13 – шина КПА; 14 – шина данных космического аппарата; 15 – шина питания космического аппарата
- Рис. 5.** Оптическая схема аппаратуры: 1 – лазерный модуль с мощностью 50 мВт и длиной волны 650 нм; 2 – диафрагмы; 3 – зеркало; 4 – исследуемый прозрачный образец; 5 – массив фотоприемников (восемь фототранзисторов); 6 – поглотитель лазерного пучка; 7 – регистрируемое рассеянное лазерное излучение; 8 – RGB-светодиоды; 9 – фотодиод; 10 – система перемещения образца вдоль области сканирования
- Рис. 6.** Изменение спектральной прозрачности стекла для длины волны 650 нм (красная область, кривая 1), 525 нм (зеленая область, кривая 2), 470 нм (синяя область, кривая 3)
- Рис. 7.** Структурная схема кварцевых весов: 1 – кварцевый кристалл опорного канала, 2 – кварцевый канал измеряемого канала, 3, 4 – генераторы, 5 – частотный дискриминатор, 6 – датчик температуры, 7 – мультиплексор, 8, 9 – дополнительные каналы измерения
- Рис. 8.** Чистый кварцевый кристалл (слева) и кварцевый кристалл с исследуемым покрытием (справа)
- Рис. 9.** Изменение толщины покрытия, рассчитанное по изменению частоты
- Рис. 10.** Циклограмма изменения температуры внутри аппаратуры
- Рис. 11.** Структурная схема аппаратуры ЭРИ-ТЕСТ: 1–4 – микросхемы флеш-памяти с параллельной шиной адреса и данных, 5–8 – микросхемы с последовательными шинами, 9 – коммутатор питания с датчиками тока, 10 – коммутатор последовательных интерфейсов



Рис. 1.



Рис. 2.

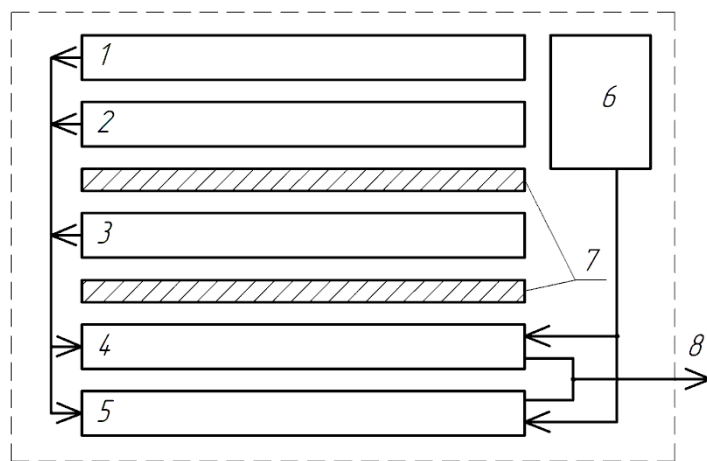


Рис. 3.

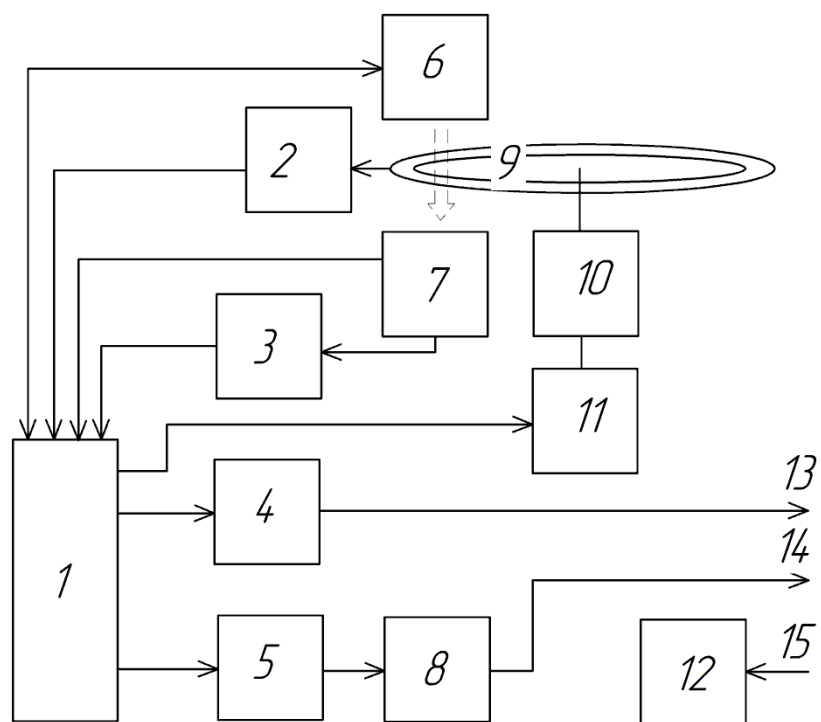


Рис. 4.

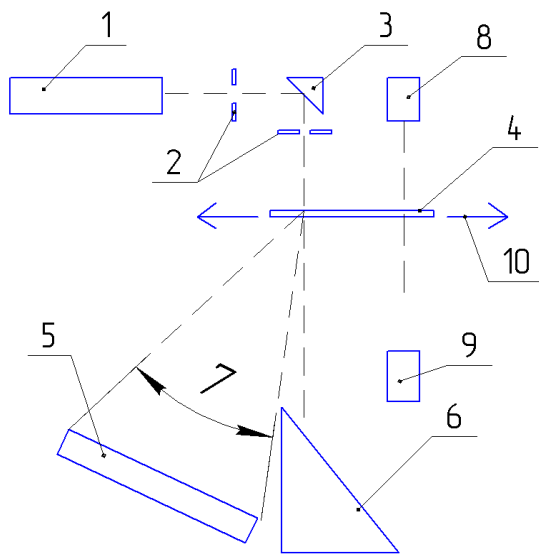


Рис. 5.

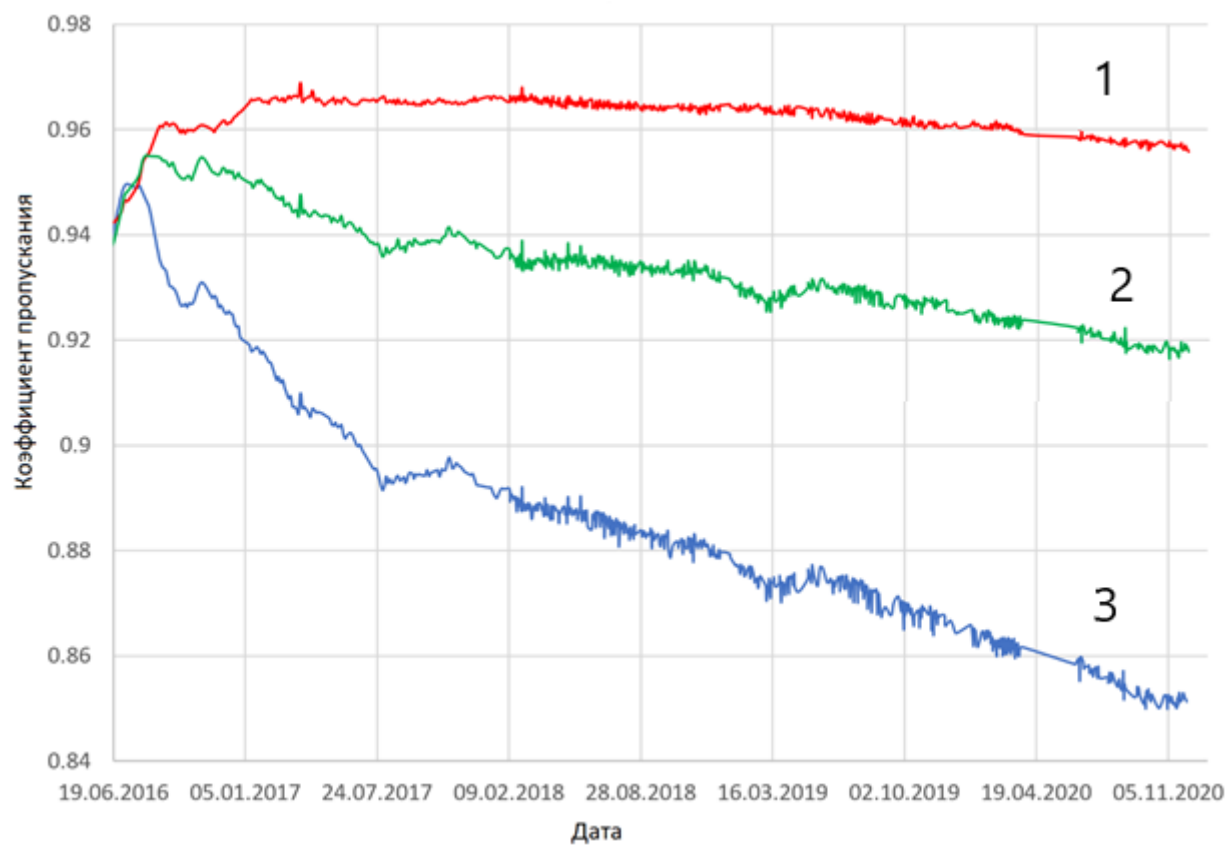


Рис. 6.

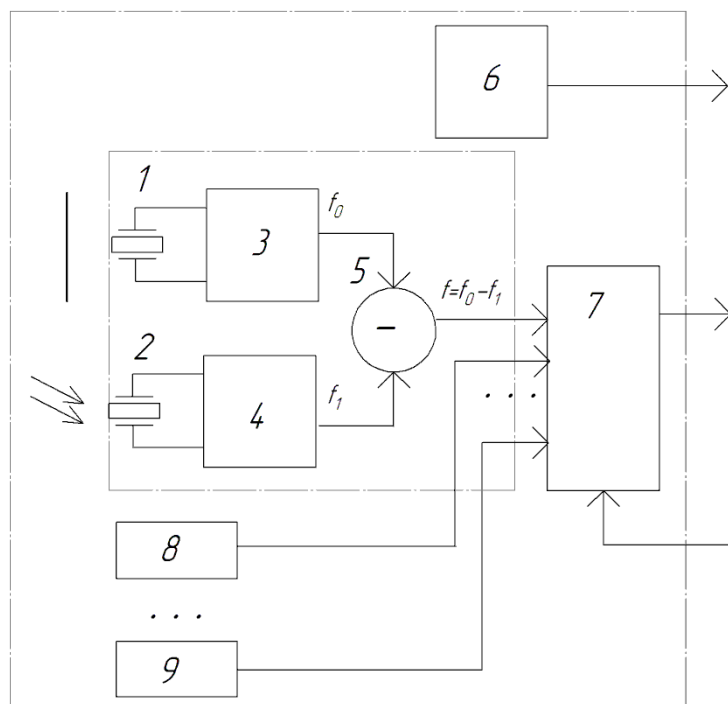


Рис. 7.

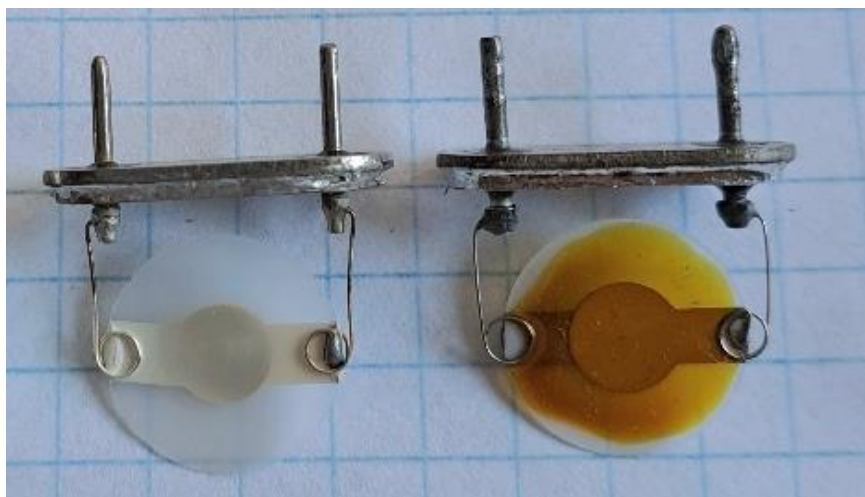


Рис. 8.

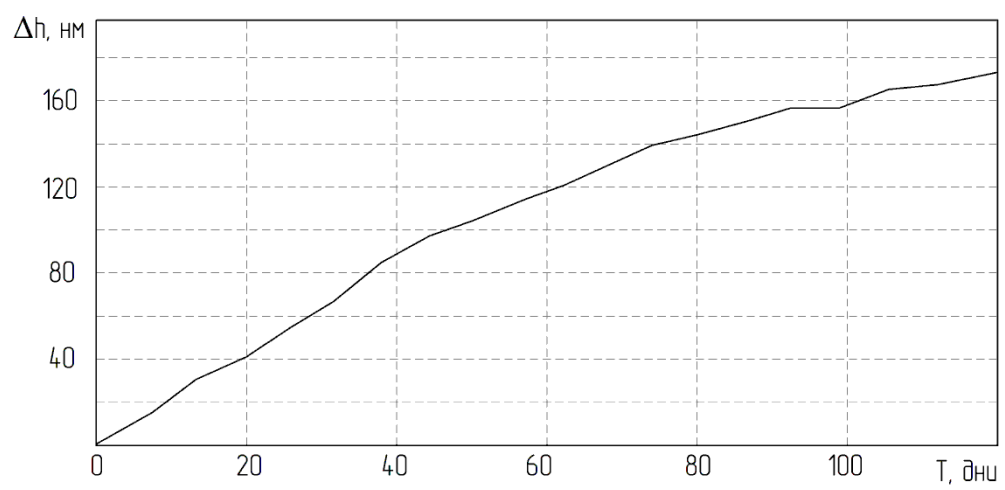


Рис. 9.



Рис. 10.

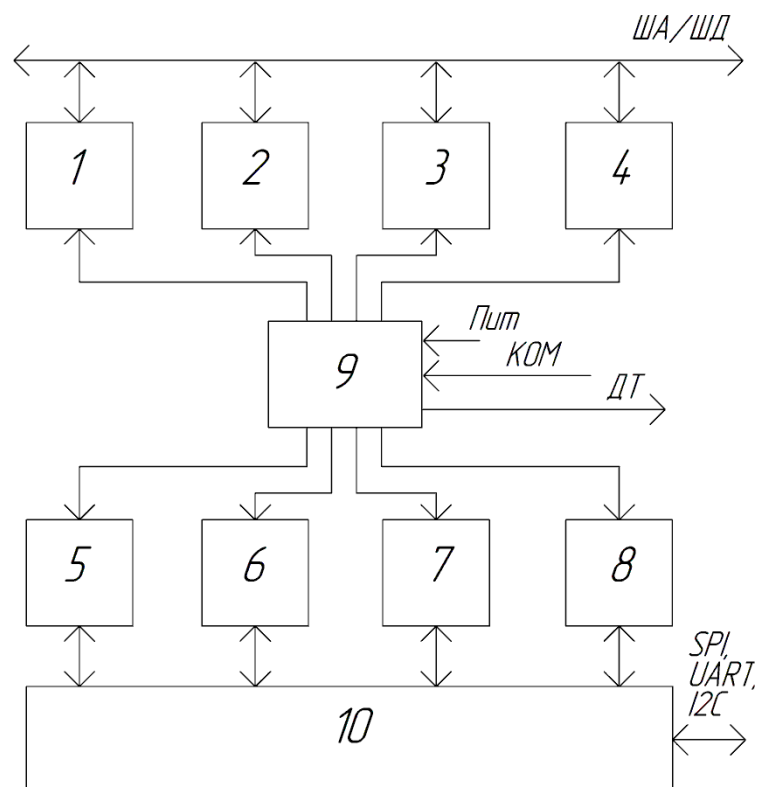


Рис. 11.