

## Ускоренные ресурсные испытания бортового фурье-спектрометра ИКФС-2

Д.О. Монахов, Ю.М. Головин

Исследовательский центр им. М.В. Келдыша,  
125438, Москва, Онежская 8  
E-mails: dmitrymonahov@gmail.com;

В статье описан стенд для проведения ускоренных ресурсных испытаний ИКФС-2 и первые результаты отработки на нем бортового фурье-спектрометра. Стенд создан в ФГУП «Центр Келдыша». Проведена первая стадия ресурсных испытаний продолжительностью в 3 месяца, в ходе которой получена наработка прибора в 1685 часов. Приведено обоснование применения выбранной методики проведения испытаний, рассмотрена ее применимость в отношении ИКФС-2. Сформулирован объем работ, необходимый для успешного завершения испытаний и определения надежности ИКФС-2. Рассмотрены перспективы применения результатов испытаний.

**Ключевые слова:** бортовой фурье-спектрометр, надежность бортовой аппаратуры, ускоренные ресурсные испытания, электротермотренировка.

Одним из этапов опытно-конструкторской работы по созданию бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 (рисунок 1) является проведение ресурсных испытаний. ИКФС-2 представляет собой оптико-механический прибор с электронным модулем управления и предназначен для установки на космический аппарат Метеор-М. Ресурс ИКФС-2 в орбитальном полете должен составлять не менее 5 лет. Важными функциональными компонентами ИКФС-2 являются:

1. Оптические элементы для пропускания инфракрасного излучения с просветляющими покрытиями, зеркала с отражающими покрытиями.
2. Прецизионный привод маятника фурье-спектрометра, прецизионный привод зеркала модуля сканера с механическим редуктором.
3. Подшипники качения маятника.
4. Фотоприемник из материала КРТ.
5. Микросхемы, диоды, транзисторы, конденсаторы, реле, соединители и другие изделия электроники.

Режим работы фурье-спектрометра – непрерывный.

Для определения показателей надежности, работоспособности прибора в различных переходных режимах, в ходе непрерывного длительного применения, при воздействии электрических и термических нагрузок, выбрана методика проведения испытаний, приведенная в [1]. В основу методики положена циклографма испытаний, приведенная на рисунке 2. Для реализации данной циклографмы создана установка «Ресурс», показанная на рисунке 3.

Схематично установка «Ресурс» представлена на рисунке 4. В теплоизолированной герметичной камере 1 с помощью системы крепления 8 расположена испытываемая аппаратура ИКФС-2, состоящая из модулей, соединенных кабелями 10 (рисунок 5). Вакуумный насос 2 снижает давление в камере до 5 кПа абсолютного давления. После этого камеру 1 заполняет азот из системы 4. Затем процесс вакуумирования и заполнения повторяют еще 2 раза. При необходимости с помощью фурье-спектрометра ИКФС-2 может быть выполнен контроль содержания паров воды в атмосфере герметичной камеры.



Рис. 1. Оптико-механический блок бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 со снятым радиационным холодильником

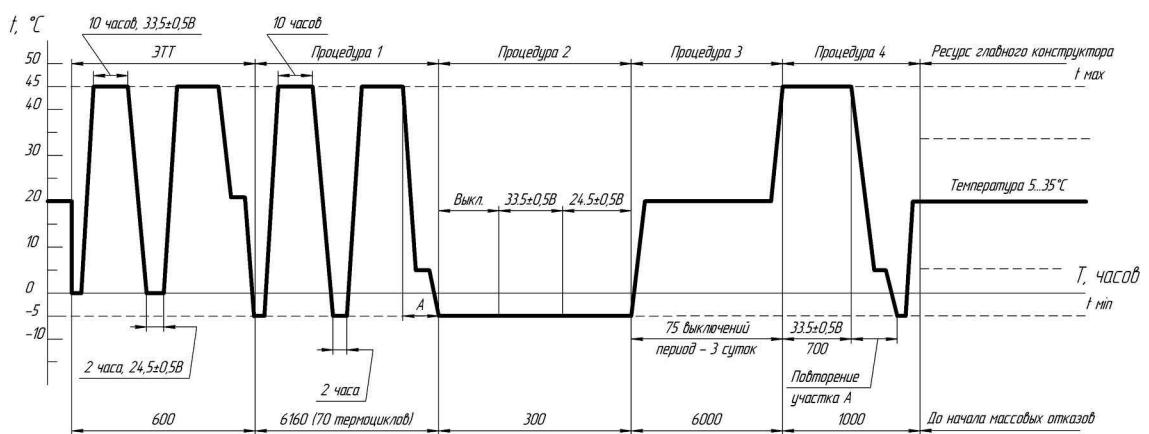


Рис. 2. Циклограмма проведения ускоренных ресурсных испытаний



Рис. 3. Общий вид установки «Ресурс»

Захолаживание фотоприемника выполняется с помощью системы 3, подводящей жидкий азот к термостату с фотоприемником по специальным трубкам, проходящим через гермоввод. Возможность тепловых воздействий на ИКФС-2 реализована с помощью контура 7. Жидкий теплоноситель на основе этиленгликоля при заданной температуре подается в систему теплообменников, расположенных внутри камеры 1. Теплообмен осуществляется между теплообменниками и азотной средой камеры. Для повышения интенсивности теплообмена использованы вентиляторы. Система терморегулирования установки позволяет охлаждать аппаратуру с градиентом в 5-10 °/час, температура среды может находиться в диапазоне от минус 10°C до плюс 70°C.

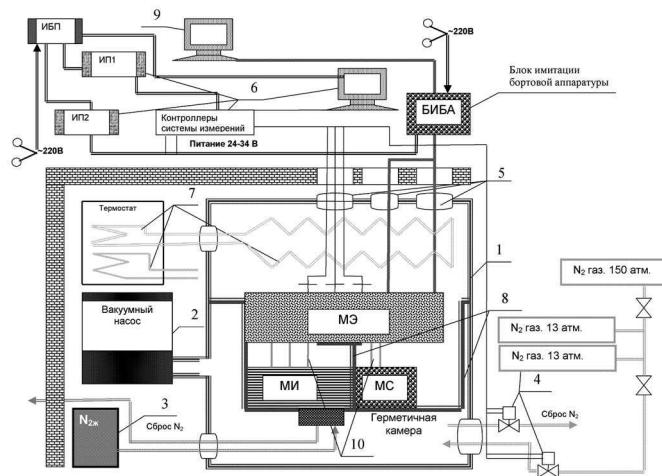


Рис. 4. Схема установки «Ресурс»

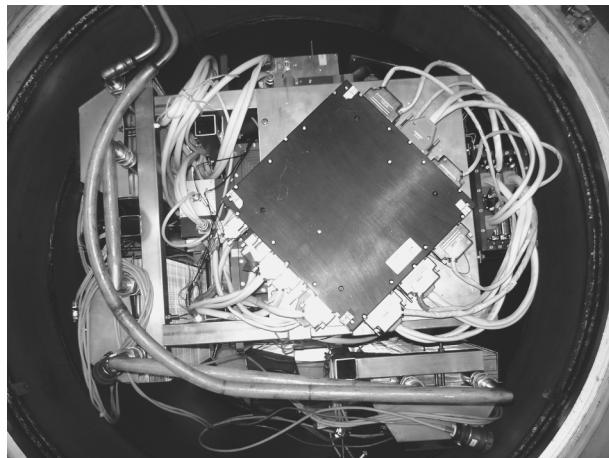


Рис. 5. ИКФС-2 в установке перед началом испытаний

Напряжение питания подается на ИКФС-2 через проходные электрические герморазъемы 5 от блока имитации бортовой аппаратуры (БИБА), расположенного снаружи герметичной камеры. Через гермоподъемы 5 подано питание на вентиляторы теплообменников, осуществленастыковка всех необходимых электрических соединителей ИКФС-2, БИБА и системы измерений, выполнена коммутация системы датчиков температуры.

После задания режима установка работает автономно без участия человека. Для этого к ней подключена система измерений и аварийной защиты 6. Данная система автоматически измеряет и регулирует повышенное давление азота в герметичной камере 1, выполняет измерение значений температуры, напряжений питания узлов прибора, тока питания аппаратуры, наличия электропитания установки. В алгоритмах аварийного отключения используется 5 параметров:

- наличие электропитания установки,
- активное состояние (отсутствие зависания) персонального компьютера системы измерений и аварийной защиты,
- температура испытываемой аппаратуры (по 2 датчикам),
- избыточное давление в герметичной камере (двухсторонний критерий),
- ограничение по максимальному значению тока питания ИКФС-2.

При срабатывании хотя бы одного алгоритма выдается команда на обесточивание установки. В целом, система измерений контролирует 28 параметров прибора, каждый из которых может быть программно включен в алгоритм аварийной защиты.

Кроме того, за счет конструкции системы подачи азота в герметичную камеру, ограничен максимальный перенаддув данной камеры. Наддув осуществляется из баллона, объемом 10 литров, давление 1.3 МПа, при объеме герметичной камеры 800 литров. В данном случае, максимальный перенаддув камеры может составить не более 0.15 атмосфер.

Диагностика состояния и управление работой ИКФС-2 во время испытаний в основном выполняется с помощью контрольно-измерительной аппаратуры из состава прибора. Возможности применения установки «Ресурс» не ограничиваются испытаниями ИКФС-2.

Как известно [2], основные воздействия космического пространства на бортовую аппаратуру в зоне базирования КА Метеор-М на солнечно-синхронной орбите, сводятся к следующим:

1. Потеря массы вследствие газовыделения.
2. Воздействие метеорных космических частиц.
3. Воздействие ионизирующих излучений, тяжелых заряженных частиц.
4. Тепловое излучение Солнца и Земли, интенсивное тепловое излучение аппарата в «холодный» космос.
5. Отсутствие естественной конвекции внутри блоков аппаратуры, конвективного теплосъема с внешних поверхностей.
6. Отсутствие окислительного воздействия паров воды и кислорода.
7. Отсутствие веса.
8. Отсутствие воздушного демпфирования при вибрациях.
9. Склонность к возникновению электрических разрядов.
10. Холодная сварка контактных поверхностей;
11. Сухое трение и изнашивание трущихся пар в вакууме.

Анализируя перечень воздействий на аппаратуру, а также принимая во внимание весь объем наземной отработки ИКФС-2, можно заключить следующее:

- По пунктам 10-11 моделирование воздействия требует наличия вакуума более чем  $10^{-5}$  Па. В связи с тем, что подобные условия для испытаний большой продолжительности реализовать затруднительно, данный вид воздействия установка не моделирует. По примененным материалам (сталь 20Х13) со смазкой ВНИИ НП-274 имеется положительный опыт натурной эксплуатации. Вопрос определения скорости износа трущихся пар в ходе испытаний, соотношения скоростей износа при натурной эксплуатации и при данных ресурсных испытаниях, в данной работе не рассмотрен.
- По пп. 2, 7 проведение испытаний возможно, но требует применения отдельных специализированных стендов. При этом воздействие по п. 2 не накапливается при длительной эксплуатации и может быть смоделировано на отдельных испытаниях при необходимости. Воздействие по п. 7 облегчает режим работы механических частей конструкции. Работоспособность изделия в условиях невесомости обеспечивается конструктивными способами.
- Воздействие по п. 9 установка не моделирует. Появление электрических разрядов исключено конструктивно-схемными решениями аппаратуры и проверено экспериментально в ходе отдельных испытаний по проверке работоспособности в вакууме.

- Воздействие по п. 3 подлежит моделированию на автономном специализированном стенде.

- Воздействие по п. 1 подлежит проверке на этапе тепловакуумных испытаний. При использовании в конструкции материалов, разрешенных к применению в изделиях космической техники специальными ограничительными перечнями, данное воздействие не оказывает значительного влияния на долговечность бортовой аппаратуры.

- Воздействия по пп. 4-5 проверены в ходе тепловакуумных испытаний ИКФС-2. Моделирование теплового режима модулей прибора выполнено с помощью стеневой системы терморегулирования.

- По п. 6 влияние паров кислорода и воды на работу ИКФС-2 исключено за счет проведения испытаний в среде азота особой чистоты.

- Воздействие по п. 8 не влияет на долговечность ИКФС-2, влияние на работоспособность проверено на этапе тепловакуумных испытаний.

При подготовке испытаний были сформулированы следующие задачи:

1. Получение максимально возможной информации о долговечности и безотказности прибора ИКФС-2 к моменту запуска.

2. Минимальное участие оператора в проведении испытаний.

Для реализации первой задачи было принято решение о проведении испытаний в непрерывном круглосуточном режиме с технологическими перерывами 1-2 раза в месяц. За счет системы автоматического отключения удалось избежать необходимости дежурства оператора в вечернее и ночное время, а также в выходные. Необходимая подстройка режима при необходимости может быть выполнена в рабочее время.

Ресурсные испытания ИКФС-2 проводятся в 2 стадии на 2 образцах ИКФС-2, идентичных по своей конструкции. Первая стадия является пробной и позволяет оценить перспективы применения установки. За время первой стадии испытаний:

1. Получена наработка прибора 1685 часов в известном термоэлектрическом режиме в среде газообразного азота особой чистоты. За время наработки соотношение сигнал-шум в интерферограмме (основной критерий работоспособности) не изменилось. Для определения соотношения использован бортовой модуль калибровки.

2. Выполнено моделирование теплового режима модуля электронного. Получена зависимость температуры модуля электронного от температуры среды в герметичной камере (рисунок 6). При этом интенсивность процессов теплообмена обеспечена близкой к интенсивности в гермоотсеке КА «Метеор-М» (вентилируемый гермоотсек обеспечивает коэффициент теплоотдачи на уровне  $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{K})$ , естественная конвекция в ограниченном пространстве герметичной камеры – в диапазоне  $4\text{-}5.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{K})$ ).

3. Обнаружено влияние температуры на равномерность работы маятника интерферометра (рисунок 7). При дальнейшей диагностике отмечено отклонение формы сигнала референтного канала от требуемой бочкообразной формы.

4. Обнаружена (рисунок 8) нестабильность и пониженная амплитуда напряжения питания лазеров, установленных в системе управления качанием маятника. Нестабильность наблюдалась до приостановки испытаний и доработки прибора. После этого нестабильность устранена (рисунок 9).

5. Накоплены статистические данные о влиянии углового положения зеркала сканера в рабочем режиме на относительную неравномерность хода маятника интерферометра (рисунок 10). Здесь же было обнаружено, что сканер устанавливается не всегда в точ-

ное положение. Это хорошо видно по точкам, не попадающим на вертикальную линию, соответствующую точному расположению.

6. Накоплены замечания по программному обеспечению ИКФС-2 и КИА, а также по работе технологического оборудования.

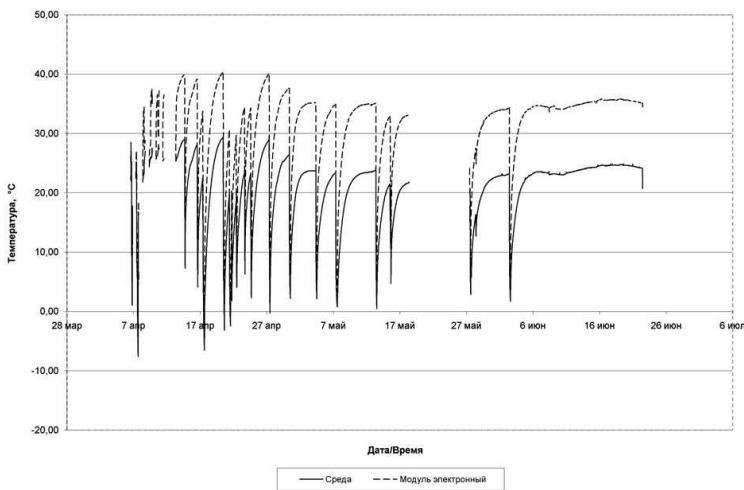


Рис. 6. Динамика температуры модуля электронного и среды заполнения герметичной камеры

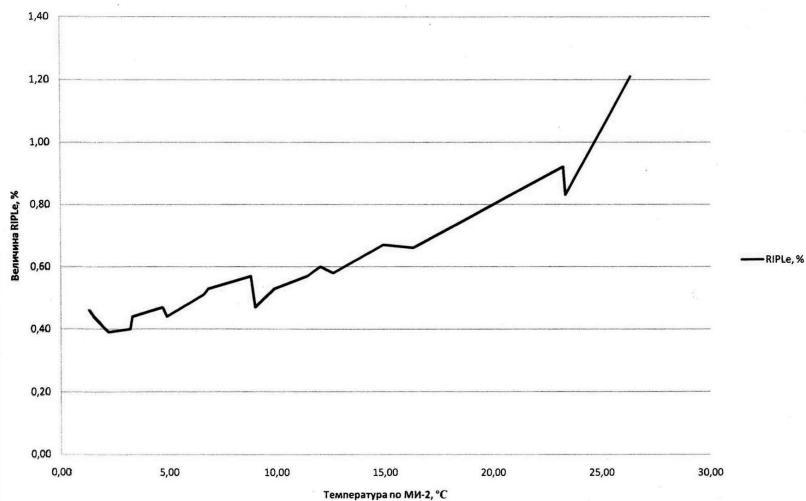


Рис. 7. Влияние температуры на величину относительной неравномерность скорости перемещения маятника интерферометра

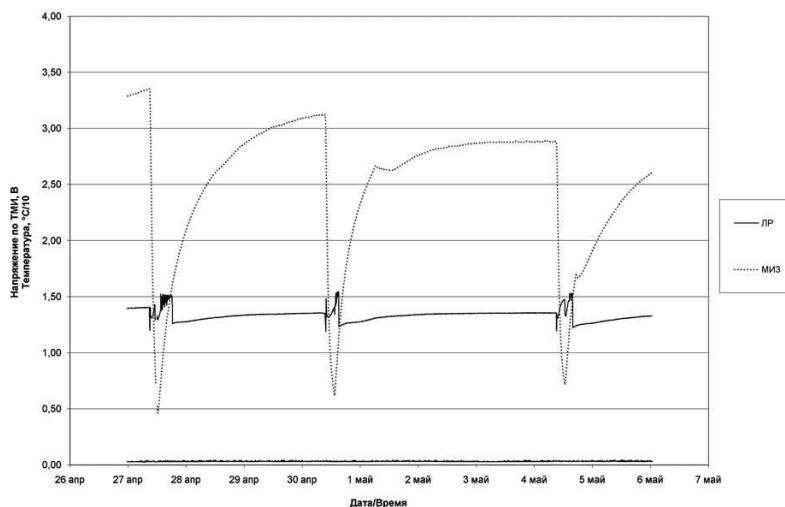


Рис. 8. Влияние температуры на стабильность напряжения питания лазера референтного канала.  
Температура показана пунктирной линией

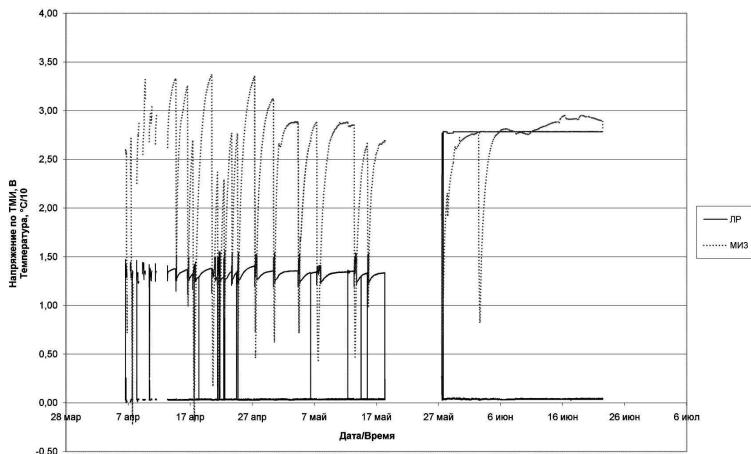


Рис. 9. Значение напряжения питания лазеров после доработки (правая часть графика). Нестабильность при понижении температуры устранена. Температура показана пунктирной линией

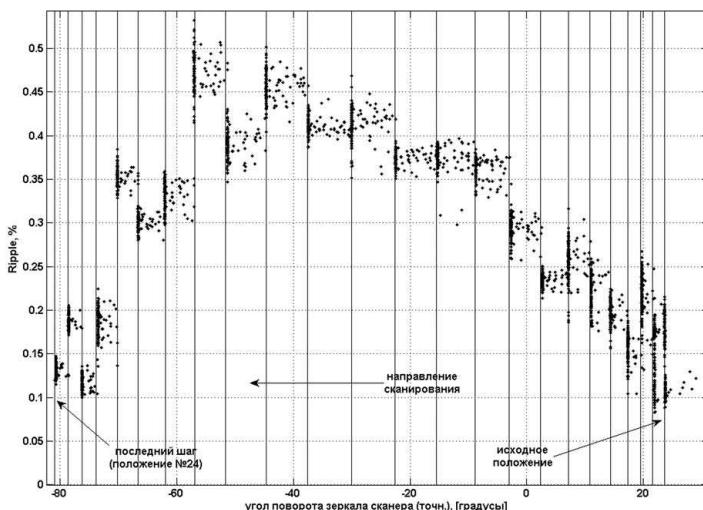


Рис. 10. Статистика положений зеркала сканера при обзоре. Зависимость относительной неравномерности хода качалки от текущего положения зеркала. Виден рой точек, соответствующих неверным положениям зеркала

По всем замечаниям проведены мероприятия по их устраниению. После этого стабильная наработка прибора составила 620 часов.

Испытания ИКФС-2 по описанной выше методике позволяют решать задачи доводки и подтверждения характеристик прибора благодаря следующим факторам:

1. Возможность накопления обширной статистики по основным параметрам любого из узлов аппаратуры.

2. Возможность оценки влияния комбинированного воздействия на аппаратуру одновременно электрического режима, холода/тепла и непрерывной наработки с одновременным контролем всех узлов прибора.

3. Возможность проведения ускоренных испытаний электрической части аппаратуры на долговечность и безотказность.

Недостатком описанной программы испытаний является неизвестный характер воздействия ускоренного режима на механическую часть аппаратуры ИКФС-2, а также отсутствие критериев для сравнения воздействия вакуума и сухого азота. Это приводит к тому, что в отношении механических узлов коэффициент ускорения остается неизвестным. Для решения

данной проблемы следует по результатам ускоренных испытаний (и даже параллельно с ними) провести контроль параметров механических узлов, выполнить на аналогичных узлах отдельные поузловые испытания по экспериментальному уточнению параметров, не поддающихся расчету. Окончательный вывод о величинах коэффициентов ускорения для механических узлов может быть сделан после проведения данной работы. На его основании может быть принято решение о достаточности проведенных ускоренных испытаний, либо о необходимости проведения дополнительного объема испытаний для этой группы узлов.

Для завершения работ по экспериментальному подтверждению надежности ИКФС-2 следует:

1. Определить режим работы узлов трения на испытаниях по литературным данным, и с учетом полноты моделирования определить коэффициент ускорения для этой группы узлов (моделирование натурных условий по п. 10-11, см. выше). При необходимости могут быть проведены дополнительные поузловые испытания в установке, моделирующей космический вакуум.
2. Провести дефектацию образца по завершении процедуры 4 циклограммы.
3. После дефектации образца №2 провести замену узлов, имеющих повреждения и установить образец на испытания в нормальном режиме. По времени данный момент близок к моменту запуска летного образца аппаратуры.
4. Сравнить результаты испытаний образца №2 в режимах с различными значениями напряжений питания и рабочей температуры, в нормальном режиме. Определить параметры узлов ИКФС-2, изменение которых определяет расходование ресурса и чувствительно к термоэлектрическому режиму испытаний. При этом учесть уже имеющуюся наработку образца №1 в 1685 часов.
5. Определить коэффициент ускорения по каждому из параметров по методике, изложенной в [3]. Для ряда изделий электронной техники могут быть взяты за основу эмпирические формулы, приведенные в [4]. На данном этапе может быть проведено сравнение с рабочими параметрами, которые продемонстрирует летный образец ИКФС-2.

Результаты работ по пунктам 1-5 в соответствии с принятой методикой [3] позволяют выявить параметры, определяющие изменение работоспособности узлов прибора со временем, а также количественно оценить форссирующее воздействие. Это позволит разработать для узлов перспективного фурье-спектрометра программу форсированных испытаний на надежность с известным значением коэффициента ускорения.

## Литература

1. ГОСТ Р В 50698-94. Системы радиоэлектронные бортовые КА. Нормы ускоренных ресурсных испытаний. – М.: Госстандарт России, 1994, 20 с.
2. Нусинов М.Д. Влияние космического вакуума на материалы и устройства научной аппаратуры. – М.: Машиностроение, 1987, 176 с.
3. РД В 319.01.11-98. КСКК. АПУОВН. Типовые методики ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. – М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2000, 95 с.
4. Ушаков И.А. Надежность технических систем. Справочник. – М.: «Радио и связь», 1985, таблица 24.1.

# **Accelerated reliability testing of spaceborne FTIR spectrometer IRFS-2**

**D.O. Monakhov, U.M. Golovin**

*Keldysh Research Center  
125438, Moscow, Onejskaja st. 8  
E-mails: dmitrymonahov@gmail.com;*

The paper describes the test bench for accelerated reliability tests of IKFS-2 and the first results of the spaceborne fourier-spectrometer turnaround hereat. The installation has been created in Keldysh Research Center. The first stage of the reliability test that lasts 3 months has been conducted, where the equipment running time of 1685 hours has been reached. The substantiation of the chosen methods of test is given, its applicability concerning IKFS-2 is addressed. The amount of further activity required for accomplishing the tests and determining the reliability of IKFS-2 is defined. The prospect of application of the tests' results are considered.

**Key words:** accelerated reliability tests, reliability of spaceborne equipment, electro heat ageing, spaceborne fourier-transform spectrometer IRFS-2.