

<u>ИПМ им.М.В.Келдыша РАН</u> • <u>Электронная библиотека</u> <u>Препринты ИПМ</u> • <u>Препринт № 76 за 2014 г.</u>



Путин Г.Ф., Глухов А.Ф., Бабушкин И.А., Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Иванов А. И., <u>Сазонов В.В.</u>

Эксперименты с датчиком конвекции ДАКОН-М на МКС и ТГК «Прогресс»

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Эксперименты с датчиком конвекции ДАКОН-М на МКС и ТГК «Прогресс» / Г.Ф.Путин [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 76. 40 с. URL: <u>http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-76</u>

## РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК Ордена Ленина ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им. М.В.Келдыша

### Г.Ф. Путин, А.Ф. Глухов, И.А. Бабушкин, Д.А. Завалишин, М.Ю. Беляев, А.И. Иванов, В.В. Сазонов

# ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДАТЧИКОМ КОНВЕКЦИИ ДАКОН-М НА МКС И ТГК «ПРОГРЕСС»

#### Аннотация

Приведены результаты экспериментов с датчиком конвекции ДАКОН-М на борту Служебного модуля Международной космической станции (МКС). Проведено сопоставление измерений датчика и результатов расчета квазистатической компоненты микроускорения в точке его установки. Для сопоставления взяты четыре отрезка измерений из экспериментов 2011 г. во время стыковок и отстыковок шаттлов. При расчете микроускорения использованы данные измерений низкочастотного акселерометра MAMS, установленного в модуле Lab, и телеметрическая информация о вращательном движении МКС. Эта информация позволила пересчитать измерения MAMS в точку установки датчика конвекции ДАКОН-М. Сравнение показаний датчика и расчетных микроускорений показало достаточно хорошее совпадение расчетных и измеренных данных. Успех экспериментов был обусловлен выбором условий их проведения, когда микроускорения на борту были сравнительно велики – существующий вариант датчика не обладает достаточной чувствительностью для регистрации микроускорений во время «спокойного» полета станции режиме орбитальной ориентации, поддерживаемой гиродинами. В связи с этим предлагается проводить эксперименты с новым вариантом датчика на транспортных грузовых кораблях (ТГК) «Прогресс», на которых за счет выбора режимов вращательного движения можно обеспечить широкий диапазон максимальных амплитуд квазистатических микроускорений. Приведены примеры расчета внешних воздействий на датчик, реализуемых в различных режимах вращательного движения ТГК.

G.F.Putin, A.F.Glukhov, I.A.Babushkin, D.A.Zavalishin, M.Yu.Belyaev, A.I.Ivanov, V.V.Sazonov. Experiments with convection sensor DAKON-M onboard ISS and spacecraft Progress. We describe the results of the experiments with convection sensor DAKON-M installed onboard the International Space Station (ISS). We compare measurements of the sensor with calculated values of quasi-steady accelerations at the point of sensor installation. The comparison was made on 4 segments picked out of the experiments in 2011 year. Shuttles docked to the station and undocked from it in those segments. To calculate the acceleration we use measurements of the low-frequency accelerometer MAMS, located in segment Lab of ISS, and telemetry information about the stations attitude motion. The use of telemetry data allowed us to recalculate the MAMS measurements from the MAMS place to the point of the sensor installation. The comparison of the sensor measurements with the calculated accelerations showed their certain coincidence. The success of experiments was caused by conditions of their carrying out, when accelerations onboard ISS were rather large. The used variant of convection sensor was not sufficiently sensitive. In view of this situation, we investigate the possibility to carry out experiments with new variant of DACON onboard spacecraft Progress. Wide range of quasi-steady accelerations can be provided on these spacecraft by appropriate choice of their attitude motion. We give examples of calculations of input influence on the sensor realized in various modes of spacecraft attitude motion.

1. Датчик конвекции Дакон-М. Датчик конвекции ДАКОН-М представляет собой полость в форме цилиндра, заполненную углекислым газом. Диаметр и высота цилиндра имеют одинаковое значение L=10 см. На противоположных основаниях цилиндра поддерживается фиксированная разность температур  $\Delta T = 60^{\circ}$  С. Внутри полости установлены две дифференциальные термопары для измерения разностей температур в двух парах фиксированных точек. Эти разности температур – показания датчика. Датчик ДАКОН-М является усовершенствованным вариантом датчика ДАКОН, эксперименты с которым проводились на орбитальной станции «Мир» [1]. Как показано в [2 – 5], показания датчика конвекции зависят от испытываемых им микроускорений. Такой датчик – пример гравитационно-чувствительной системы.

Измерения датчика выдаются в цифровом виде с шагом 1с. Чтобы пояснить эти измерения, свяжем с датчиком правую декартову систему координат  $Dx_1x_2x_3$ . Начало системы, точка D, находится на оси цилиндра вблизи его центра. Ось  $Dx_3$  направлена по оси цилиндра от его холодного основания к горячему. Пары точек, в которых измеряются разности температур, расположены на осях  $Dx_1$  и  $Dx_2$ . Точки каждой пары расположены симметрично относительно оси  $Dx_3$ , причем все точки одинаково удалены от нее.

Влияние микроускорений на датчик конвекции зависит от частотных свойств датчика и микроускорений. В орбитальном полете датчик ведет себя как линейный фильтр низких частот, и его показания допускают простую интерпретацию. Обозначим  $Q_1$  и  $Q_2$  разности температур в термопарах, расположенных по осям  $Dx_1$  и  $Dx_2$  соответственно. Пусть  $\varepsilon_i$  и  $n_i$  (i = 1, 2, 3) – компоненты в системе координат  $Dx_1x_2x_3$  низкочастотных составляющих углового ускорения этой системы и микроускорения точки D,  $\beta \approx 0.003$ K<sup>-1</sup> – коэффициент теплового расширения газа в полости. Тогда  $Q_1 \sim F_1$ ,  $Q_2 \sim F_2$ , где

$$F_1 = kn_1 - 2\varepsilon_2, \quad F_2 = kn_2 + 2\varepsilon_1, \quad k = \frac{\beta \Delta T}{L} \approx 1.8 \,\mathrm{m}^{-1}.$$
 (1)

Как видно из приведенных соотношений, показания датчика могут служить интегральной характеристикой микрогравитационной обстановки на борту космического аппарата в области низких частот. Кроме того, сравнение измерений датчика с результатами математического моделирования конвекции газа в полости, полученными с учетом реальных испытываемых полостью линейных и угловых микроускорений (ср. [3,4,6]), позволит оценить точность принятой математической модели. Все это объясняет интерес к экспериментам такого рода.

Ниже приводятся последние результаты анализа экспериментов с датчиком ДАКОН-М на борту МКС. Они заключаются в сопоставлении показаний датчика с функциями  $F_1(t)$  и  $F_2(t)$ . Значения этих функций рассчитаны по телеметрической информации о вращательном движении станции и по данным измерений американского акселерометра MAMS. Затем обсуждается возможность выполнения экспериментов с датчиком на транспортных грузовых кораблях (ТГК) «Прогресс» в их автономном полете.

2. Эксперименты на МКС. Данные измерений датчика ДАКОН-М и акселерометра МАМЅ. На обсуждаемых ниже отрезках времени датчик был установлен в Служебном модуле (СМ) МКС. Направления осей системы координат  $Dx_1x_2x_3$  и координаты точки D задавались в системе  $Oy_1y_2y_3$ , связанной СМ. Точка О – центр масс станции, ось  $Oy_1$  параллельна продольной оси СМ и направлена от его переходного отсека к агрегатному отсеку, ось  $Oy_2$  перпендикулярна оси вращения солнечных батарей СМ. Направления осей систем  $Dx_1x_2x_3$  и  $Oy_1y_2y_3$  связаны соотношениями  $x_1 = -y_2$  и  $x_2 = -y_1$ ,  $x_3 = -y_3$ . Ниже, если не оговорено особо, компоненты векторов и координаты точек указываются в системе  $Oy_1y_2y_3$ .

Низкочастотный акселерометр MAMS установлен в американском модуле Lab и измеряет кажущееся ускорение – микроускорение с обратным знаком. Его измерения рассматриваются как измерения микроускорения в левой системе координат  $Mz_1z_2z_3$ , направления осей которой связаны с осями системы  $Oy_1y_2y_3$  формулами:  $z_1 = y_1$ ,  $z_2 = y_2$  и  $z_3 = -y_3$ . Скорость выборки MAMS – 10 измерений в секунду, прибор позволяет измерять микроускорения в диапазоне частот  $10^{-5} \div 5$  Гц и диапазоне амплитуд  $10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-3}$  м/с<sup>2</sup>.

Группа PIMS (Principal Investigator Microgravity Services) NASA, курирующая акселерометр, выполняет низкочастотную фильтрацию его измерений и устраняет смещение нуля. Обработанные данные имеют шаг по времени 16 с. Ниже использованы обработанные данные, пересчитанные в систему  $Oy_1y_2y_3$ .

Данные измерений датчика конвекции и акселерометра рассматриваются на четырех отрезках времени, сведения о которых приведены в табл. 1 - 3. Графики зависимости от времени этих данных, а также графики микроускорений, функций  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  и параметров вращательного движения станции представлены на рис. 1 - 4. Номер рисунка соответствует номеру отрезка в таблицах. На всех выбранных отрезках МКС находилась в орбитальной ориентации, которая поддерживалась реактивными двигателями СМ или ТГК «Прогресс-М». Двигатели выключались за несколько минут до начала динамической операции и включались через несколько минут после ее окончания. На выбранных отрезках имели место и контакты кораблей со станцией, и срабатывания реактивных двигателей.

В табл. 1 для каждого отрезка указана информация о типе операции – стыковка или отстыковка шаттла, обозначение экспедиции шаттла, дата и время начала проведения операции, наименование задействованного стыковочного узла МКС. В табл. 2 приведены начальные точки  $t_0$  и длины выбранных отрезков измерений, а также количество содержащихся на отрезке моментов времени с измерениями датчика конвекции и акселерометра. В табл. 3 приведены координаты точек установки акселерометра и датчика конвекции на рассматриваемых отрезках. Графики данных измерений акселеро-

метра и датчика конвекции изображены черными линиями в левых частях рис. 1 – 4 с индексами «б» и «в» соответственно.

Отрезок	Дата	Время начала операции (ДМВ)	Стыков. узел	Экспеди- ция шаттла	Операция
1	07.03.2011	15:00:00	PMA-2	STS-133	Стыковка
2	30.05.2011	06:55:00	PMA-2	STS-134	Отстыковка
3	10.07.2011	18:07:24	PMA-2	STS-135	Стыковка
4	19.07.2011	09:28:00	PMA-2	STS-135	Отстыковка

Таблица 1. Динамические операции на МКС

Таблица 2. Отрезки данных измерений датчика ДАКОН-М и акселерометра MAMS

Отрезок	Интервал аппроксимации движения станции		Количество точек М	
	<i>t</i> <sub>0</sub> (ДМВ)	Длина (мин)	ДАКОН-М	MAMS
1	13:09:20	196.4	2363	737
2	05:05:48	194.0	2329	728
3	15:58:20	213.6	2563	801
4	07:46:40	188.0	2257	706

Таблица 3. Координаты датчика ДАКОН-М и акселерометра MAMS в соответствии с массово-инерционными характеристиками (МИХ) МКС

МИХ	Время действия МИХ	Координаты	Координаты
	между операциями	ДАКОН-М (м)	MAMS (M)
3172	$26.02.2011 \div 07.03.2011$	30.4, -0.2, -0.8	-8.1, -0.1, -0.5
3170	07.03.2011 ÷ 16.03.2011	35.2, 2.7, -0.6	-3.3, 2.8, -0.4
3430	23.05.2011 ÷ 30.05.2011	34.7, 2.3, -0.6	-3.9, 2.4, -0.3
3090	30.05.2011 ÷ 09.06.2011	30.3, -0.3, -0.7	-8.3, -0.2, -0.4
3460	23.06.2011 ÷ 10.07.2011	31.1, -0.2, -0.7	-7.4, -0.1, -0.4
3470	10.07.2011 ÷ 19.07.2011	35.7, 2.8, -0.5	-2.8, 2.9, -0.2
3510	$19.07.2011 \div 23.08.2011$	31.0, -0.1, -0.6	-7.5, 0, -0.3

Даже обработанные данные измерений MAMS содержат составляющие с частотой более 1 Гц. Чтобы устранить их, данные сглаживались дискретными рядами Фурье [6]. Ряды строились независимо для каждой компоненты микроускорения. Ряды, построенные по данным измерений на отрезке времени  $t_0 \le t \le t_0 + T$  (T > 0), имеют вид

$$\chi_i(t) = \alpha_i + \beta_i(t - t_0) + \sum_{m=1}^M a_{im} \sin \frac{\pi m(t - t_0)}{T} \quad (i = 1, 2, 3).$$
(2)

Коэффициенты  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $a_{im}$  находились методом наименьших квадратов. Графики построенных выражений (2) в случае M = 250 изображены красными линиями в левых частях рис. 1 - 4 с индексом «в».

3. Расчет микроускорений на МКС. Микроускорения в точках установки датчика конвекции рассчитывались по телеметрической информации о вращательном движении станции и измерениям американского акселерометра MAMS. Методика расчета по телеметрической информации изложена в работах [6, 7]. Эта информация представляет собой значения кватерниона, задающего ориентацию МКС относительно абсолютной системы координат, и вектора угловой скорости станции в дискретные моменты времени с шагом около 1 с. Информация используется следующим образом. Сначала относящиеся к некоторому интервалу времени телеметрические данные – компоненты кватерниона и вектора угловой скорости – сглаживаются дискретными рядами Фурье вида (2). Число гармоник в аппроксимирующих выражениях выбирается из условия достаточно точного совпадения результатов расчета компонент угловой скорости двумя способами. В первом способе они вычисляются по выражениям (2), сглаживающим измерения угловой скорости; во втором способе - по аналогичным выражениям, сглаживающим значения компонент кватерниона, и производным этих выражений. Затем, используя полученные сглаживающие выражения и кинематические уравнения, на этом интервале вычисляется угловое ускорение станции, и, наконец, микроускорение в точке расположения датчика рассчитывается в функции времени.

Полученные значения микроускорения обусловлены движением станции как твердого тела и не содержат вклада от низкочастотных упругих колебаний ее корпуса, а также от результирующей силы, вызванной механическим взаимодействием с шаттлом и функционированием двигателей ориентации. Чтобы учесть эти факторы, в расчетные значения включались измерения акселерометра MAMS. Этот акселерометр находился на американском сегменте МКС достаточно далеко от ДАКОНа-М (см. табл. 3), и его значения в точку установки датчика пересчитывались следующим образом.

Для расчета квазистатической составляющей микроускорения известна простая формула. Пусть станция представляет собой твердое тело и точка P жестко с ней связана. Тогда квазистатическая составляющая **n** микроускорения в точке P имеет вид [2, 6, 7]

$$\mathbf{n}_{P} = \mathbf{n}(\mathbf{r}) + \mathbf{w}, \quad \mathbf{n}(\mathbf{r}) = \mathbf{r} \times \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \times \boldsymbol{\omega} + \frac{\mu_{e}}{|\mathbf{R}|^{3}} \left| \frac{3(\mathbf{R} \cdot \mathbf{r})\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^{2}} - \mathbf{r} \right|.$$
(3)

Здесь  $\mathbf{n}(\mathbf{r})$  – составляющая микроускорения, вызываемая силами инерции и гравитации,  $\mathbf{w}$  – слагаемое, обусловленное силами иной природы,  $\mathbf{r}$  – радиусвектор точки P относительно центра масс станции,  $\mathbf{R}$  – геоцентрический ради-

ус-вектор этого центра масс,  $\omega$  – абсолютная угловая скорость станции,  $\mu_e$  – гравитационный параметр Земли.

Слагаемое **w** не зависит от выбора точки P на станции. Если движение последней неуправляемо или управляется посредством гиродинов, то это слагаемое определяется в основном аэродинамическим сопротивлением [2, 6, 7]. На отрезках полета, рассматриваемых в данной работе, **w** содержит дополнительный вклад от сил, создаваемых двигателями ориентации и стыковками или расстыковками шаттлов со станцией.

Если в некоторой точке борта Q, имеющей радиус-вектор  $\mathbf{r}'$  относительно центра масс станции, измерить микроускрение  $\mathbf{n}_Q = \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{w}$  и по какой-либо информации найти величины  $\boldsymbol{\omega}$ ,  $d\boldsymbol{\omega}/dt$  и  $\mathbf{R}$ , то согласно (3) по формуле  $\mathbf{n}_P = \mathbf{n}_Q - \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{n}(\mathbf{r})$  можно найти реальную квазистатическую составляющую микроускорения в любой точке борта P. Поскольку корпус станции испытывает упругие колебания, такой пересчет справедлив только для квазистатической составляющей микроускорения – с частотами ниже частот упругих колебаний. По этой причине измерения  $\mathbf{n}_Q$  и расчет величин  $\boldsymbol{\omega}$ ,  $d\boldsymbol{\omega}/dt$  и  $\mathbf{R}$  должны быть выполнены на достаточно продолжительном отрезке времени. Однако принятый подход позволяет получить более интересные данные для математического моделирования. Справедливость такого подхода в определенной степени подтверждается результатами [6]. В этой работе формула  $\mathbf{n}_Q = \mathbf{n}(\mathbf{r}') + \mathbf{w}$  позволила со среднеквадратичной ошибкой около  $10^{-6}$ м/с<sup>2</sup> согласовать измерения MAMS и расчет микроускорений по движению МКС в случае, когда это движение управлялось с помощью гиродинов.

Некоторые результаты аппроксимации вращательного движения станции и расчета микроускорений представлены на рис. 1 – 4.

Чтобы пояснить рисунки, введем орбитальную систему координат  $OY_1Y_2Y_3$ . Ось  $OY_2$  направлена по геоцентрическому радиусу-вектору этой точки, ось  $OY_3$ направлена противоположно вектору орбитального кинетического момента станции, ось  $OY_1$  дополняет систему до правой. Положение системы  $Oy_1y_2y_3$ относительно системы  $OY_1Y_2Y_3$  будем задавать с помощью углов Крылова  $\psi$ (рысканье),  $\gamma$  (крен) и  $\theta$  (тангаж), определяемых следующим образом. Система  $OY_1Y_2Y_3$  может быть переведена в систему  $Oy_1y_2y_3$  тремя последовательными поворотами: 1) на угол  $\psi$  вокруг оси  $OY_2$ , 2) на угол  $\gamma$  вокруг новой оси  $OY_1$ , 3) на угол  $\theta$  вокруг новой оси  $CY_3$ , совпадающей с осью  $Oy_3$ .

Вернемся к рисункам. На рисунках с индексом «*a*» на графиках слева сплошные кривые представляют рассчитанную по аппроксимациям компонент кватерниона зависимость от времени углов Крылова, которые задают положение системы координат  $Oy_1y_2y_3$  относительно орбитальной системы. Маркеры рядом с этими кривыми указывают значения углов (каждое сотое значение), рассчитанные по телеметрическим значениям кватерниона. Средние графики на рис. 1а – 4а – это графики компонент угловой скорости станции. Красные кри-

вые – результат расчета компонент вектора  $\boldsymbol{\omega}$  с помощью выражений (2), сглаживающих телеметрические значения угловой скорости, черные кривые получены с использованием аналогичных сглаживающих выражений кватерниона. Справа на этих рисунках приведены графики компонент углового ускорения станции, рассчитанного по сглаживающим выражениям кватерниона и угловой скорости.

Результаты пересчета квазистатической составляющей микроускорения из точки расположения MAMS в точку расположения ДАКОНа-М приведены в правых частях рис. 1 - 4 с индексом «б». Здесь изображены графики компонент  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$  этой составляющей.

4. Эксперименты на МКС. Сопоставление расчета и измерений. Измерения датчика конвекции сопоставлялись с параметрами микрогравитационной среды, имевшей место при проведении измерений. Как было указано выше, входными сигналами датчика служат функции  $F_1(t)$  и  $F_2(t)$ , определенные формулами (1). Эти функции были рассчитаны по значениям компонент микроускорения в точке установки датчика и компонент углового ускорения станции. Графики входных сигналов изображены красными линиями в левых частях рис. 1 - 4 с индексом «в» рядом с черными графиками соответствующих измерений  $Q_1(t)$  и  $Q_2(t)$ . Непосредственное сравнение функций  $F_i(t)$  и  $Q_i(t)$  затруднительно, поскольку они измеряются в разных единицах. Более информативно сравнение безразмерных центрированных функций

$$F'_{i}(t) = \frac{F_{i}(t) - \langle F_{i} \rangle}{F_{i}^{*}}, \quad Q'_{i}(t) = \frac{Q_{i}(t) - \langle Q_{i} \rangle}{Q_{i}^{*}},$$

$$F_{i}^{*} = \max_{t} |F_{i}(t) - \langle F_{i} \rangle|, \quad Q_{i}^{*} = \max_{t} |Q_{i}(t) - \langle Q_{i} \rangle| \quad (i = 1, 2).$$

Графики таких функций приведены в правых частях рис. 1 в - 4 в; черные линии – измерения, красные – входной сигнал. Как видно из рисунков, имеет место близость обоих наборов функций, что свидетельствует об определенном успехе экспериментов и о перспективности применения датчиков такого рода в мониторинге квазистатических микроускорений на борту космических аппаратов (ср. [2-5]).

**5.** Эксперименты на ТГК «Прогресс». Микрогравитационная обстановка на Российском сегменте МКС не подходит для экспериментов с датчиком конвекции ДАКОН-М. Микроускорения в высокочастотном диапазоне (свыше 20 Гц) слишком велики из-за работы бортового оборудования, а в низкочастотном диапазоне (менее 0.1 Гц) – слишком малы для нечувствительного датчика. Чтобы сигнал датчика был содержательным – заметным образом зависел от испытываемого им возмущения, микроускорения должны быть значительными, но низкочастотными. На МКС такие условия создаются при разного рода динамических операциях (см. [5, 8, 9] и предыдущие разделы данного препринта). Подходящая обстановка может быть обеспечена на кораблях «Прогресс» за счет выбора режима их вращательного движения. Более того, выбирая нужным

образом режимы движения места установки датчика на корабле, можно обеспечить широкий диапазон амплитудно-частотных свойств микроускорений.

Возможные режимы вращательного движения кораблей «Прогресс», пригодные для проведения экспериментов в области микрогравитации, рассмотрены в [10]. Реализация некоторых их этих режимов описана в [11, 12]. В [13] описана реализация еще одного режима движения ТГК «Прогресс», который можно использовать для микрогравитационных экспериментов. Ниже рассматривается проведение экспериментов с датчиком в двух режимах: режиме одноосной солнечной ориентации (закрутки ТГК на Солнце) и режиме гравитационной ориентации вращающегося спутника.

В режиме закрутки на Солнце движение корабля близко к стационарному вращению вокруг главной центральной оси максимального момента инерции. Эта ось составляет с нормалью к плоскости солнечных батарей (СБ) угол 5÷7°. В начальный момент времени нормаль выставляется на Солнце и кораблю сообщается вокруг нее угловая скорость 2.2°/с. В результате корабль начинает совершать регулярную прецессию с малым углом нутации вокруг направления, близкого к направлению «Земля – Солнце». Под действием, в основном, гравитационного момента ось прецессии медленно поворачивается, но за 1-2 орбитальных витка, в течение которых обычно применяется этот режим, ее смещение мало. Графики компонент угловых скоростей и ускорений ТГК «Прогресс M-11М» в режиме закрутки на Солнце приведены на рис. 5а. Компоненты относятся к строительной системе координат корабля  $Oy_1y_2y_3$ : ось  $Oy_1$  параллельна его продольной оси и направлена от стыковочного узла к агрегатному отсеку, ось Оу<sub>2</sub> перпендикулярна плоскости СБ, светочувствительная сторона СБ обращена к полупространству  $y_2 > 0$ . Ниже компоненты векторов и координаты точек указываются в системе  $Oy_1y_2y_3$ .

На рис. 5б приведены графики компонент микроускорения в точках с координатами (-5м, 0.5м, 0.5м) и (-3.5м, 0.5м, 0.5м). Графики функций  $F_1(t)$  и  $F_2(t)$  для этих точек и разных положений чувствительных осей датчика приведены на рис. 5в, г. Как видно из рисунков, входной сигнал имеет простую форму и значительную амплитуду. Это обстоятельство делает режим удобным для тестирования.

Чтобы согласовать описание режима гравитационной ориентации вращающегося спутника с предыдущими публикациями [10 – 12], орбитальную систему и ее оси обозначим иначе. Систему обозначим  $OX_1X_2X_3$ . Точка O – центр масс корабля, ось  $OX_3$  направлена по геоцентрическому радиусу-вектору этой точки, ось  $OX_2$  направлена по вектору орбитального кинетического момента корабля. Будем считать, что оси строительной системы  $Oy_1y_2y_3$  являются главными центральными осями инерции корабля. Обработка по методике [13] измерений угловой скорости корабля «Прогресс M-20М», выполненных в режиме закруток на Солнце в феврале 2014 г., показала, что отклонение главной центральной оси минимального момента инерции от оси  $Oy_1$  составляет менее 1°, отклонения осей максимального и среднего моментов инерции соответственно от осей  $Oy_2$  и  $Oy_3$  не превосходит 5°.

Положение строительной системы координат относительно орбитальной системы будем задавать углами  $\gamma$ ,  $\delta$  и  $\beta$ , которые введем посредством следующего условия. Система  $OX_1X_2X_3$  может быть переведена в систему  $Oy_1y_2y_3$  тремя последовательными поворотами: 1) на угол  $\delta + \pi/2$  вокруг оси  $OX_2$ , 2) на угол  $\beta$  вокруг новой оси  $OX_3$ , 3) на угол  $\gamma$  вокруг новой оси  $OX_1$ , совпадающей с осью  $Oy_1$ . Углы  $\delta$  и  $\beta$  задают направление оси  $Oy_1$  в орбитальной системе координат, угол  $\gamma$  задает поворот корабля вокруг этой оси.

В режиме гравитационной ориентации вращающегося спутника корабль вращается с угловой скоростью 0.1 - 0.3 град./с вокруг оси  $Oy_1$ , совершающей малые колебания относительно положения, близкого к оси  $OX_3$ . Примеры движения корабля «Прогресс M-20М» в этом режиме приведены на рис. 6 (см. [12]). Здесь изображены графики зависимости от времени углов  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\beta$ , а также график разности  $\Delta \gamma(t) = \gamma(t) - c_0 - c_1 t$ , где  $c_0 - c_1 t$  – линейная аппроксимация функции  $\gamma(t)$ , построенная методом наименьших квадратов. Метод реконструкции движений, представленных на этом рисунке, описан в [12, 13].

Графики компонент угловых скоростей и ускорений ТГК «Прогресс М-20М» приведены на рис. 7 – 9 с индексом «а». На этих рисунках с индексом «б» приведены графики компонент микроускорения в точках с координатами (–5м, 0.5м, 0.5м) и (–3.5м, 0.5м, 0.5м). Графики функций  $F_1(t)$  и  $F_2(t)$  для этих точек и разных положений чувствительных осей датчика приведены на рис. 7 – 9 с индексами «в» и «г». Как видно из рисунков, входные сигналы имеют не очень простую форму, их амплитуды варьируются довольно значительно, но остаются малыми. Это обстоятельство делает режим интересным для проведения экспериментов с ДАКОНом и другими гравитационно-чувствительными системами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-01-00423).

#### Литература

- 1. Бабушкин И.А., Богатырев Г.П., Глухов А.Ф., Путин Г.Ф., Авдеев С.В., Иванов А.И., Максимова М.М. Изучение тепловой конвекции и низкочастотной микрогравитации на орбитальном комплексе «Мир» при помощи датчика «Дакон» // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 2. С. 161-169.
- Сазонов В.В., Комаров М.М., Полежаев В.И., Никитин С.А., Ермаков М.К., Зыков С.Г., Стажков В.М., Рябуха С.Б., Асеведо Х., Либерман Е. Микроускорения на орбитальной станции «Мир» и оперативный анализ гравитационной чувствительности конвективных процессов тепло-массопереноса // Космические исследования. 1999. Т. 37. № 1. С. 86-101.

- 3. Бессонов О.А., Полежаев В.И. Математическое моделирование конвекции в датчике «Дакон» в условиях реального космического полета // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 2. С. 170-178.
- 4. Никитин С.А., Полежаев В.И., Сазонов В.В. Об измерении квазистатической компоненты микроускорения на борту ИСЗ с помощью датчика конвекции // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 2. С. 179-187.
- 5. Путин Г.Ф., Глухов А.Ф., Бабушкин И.А., Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Иванов А.А., Сазонов В.В. Исследование микроускорений на борту Международной космической станции с помощью датчика конвекции ДАКОН-М // Космические исследования. 2012. Т. 50. № 5. С. 373-379.
- 6. Бабкин Е.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Сазонов В.В., Стажков В.М. Определение квазистатической компоненты микроускорения, возникающего на борту Международной космической станции // Космические исследования. 2004. Т. 42. № 2. С. 162-171.
- 7. Сазонов В.В., Беляев М.Ю., Ефимов Н.И., Стажков В.М., Бабкин Е.В. Определение квазистатической компоненты микроускорения на станции «Мир» // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 2. С. 136-147.
- 8. Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В. Оценка динамических характеристик Международной космической станции по измерениям микроускорений // Космические исследования. 2009. Т. 47. № 2. С. 193-203.
- 9. Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В. Определение характерных частот упругих колебаний конструкции МКС // Космические исследования. 2010. Т. 48. № 4. С. 362-370.
- 10. Беляев М.Ю., Бабкин Е.В., Сазонов В.В. Режимы неуправляемого вращательного движения КА «Прогресс» для экспериментов в области микрогравитации // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2004. № 44. 29 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2004-44
- Брюханов Н.А., Цветков В.В., Беляев М.Ю., Бабкин Е.В., Матвеева Т.В., Сазонов В.В. Экспериментальное исследование режимов неуправляемого вращательного движения КА "Прогресс" // Космические исследования. 2006. Т. 44. №1. С. 52-61.
- 12 Беляев М.Ю., Матвеева Т.В., Монахов М.И., Рулев Д.Н., Сазонов В.В. Реализация режима гравитационной ориентации на корабле «Прогресс М-20М» // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2014. № 63. 21 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-63
- 13 Беляев М.Ю., Матвеева Т.В., Монахов М.И., Рулев Д.Н., Сазонов В.В., Цветков В.В. Определение вращательного движения кораблей "Прогресс" по данным измерений угловой скорости и тока солнечных батарей // Космическая техника и технологии. 2013. № 2. С. 19-32.



Рис. 1а. Движение станции на отрезке 1. Момент *t* = 0 соответствует: 13:09:20 ДМВ 07.03.2011. Слева – углы, в центре – компоненты угловой скорости, справа – компоненты углового ускорения.



Рис. 1б. Отрезок 1. Момент *t* = 0 соответствует: 13:09:20 ДМВ 07.03.2011. Слева – данные МАМS и их аппроксимация, справа – данные МАМS, пересчитанные в точку установки ДАКОНа.



Рис. 1в. Отрезок 1. Момент t = 0 соответствует: 13:09:20 ДМВ 07.03.2011.



Рис. 2а. Движение станции на отрезке 2. Момент *t* = 0 соответствует: 05:05:48 ДМВ 30.05.2011. Слева – углы, в центре – компоненты угловой скорости, справа – компоненты углового ускорения.



Рис. 2б. Отрезок 2. Момент t = 0 соответствует: 05:05:48 ДМВ 30.05.2011. Слева – данные МАМS и их аппроксимация, справа – данные МАМS, пересчитанные в точку установки ДАКОНа.



Рис. 2в. Отрезок 2. Момент *t* = 0 соответствует: 05:05:48 ДМВ 30.05.2011.



Рис. За. Движение станции на отрезке 3. Момент *t* = 0 соответствует: 15:58:20 ДМВ 10.07.2011. Слева – углы, в центре – компоненты угловой скорости, справа – компоненты углового ускорения.



Рис. 3б. Отрезок 3. Момент *t* = 0 соответствует: 15:58:20 ДМВ 10.07.2011. Слева – данные МАМS и их аппроксимация, справа – данные МАМS, пересчитанные в точку установки ДАКОНа.



Рис. Зв. Отрезок 3. Момент *t* = 0 соответствует: 15:58:20 ДМВ 10.07.2011.



Рис. 4а. Движение станции на отрезке 4. Момент *t* = 0 соответствует: 07:46:40 ДМВ 19.07.2011. Слева – углы, в центре – компоненты угловой скорости, справа – компоненты углового ускорения.



Рис. 4б. Отрезок 4. Момент *t* = 0 соответствует: 07:46:40 ДМВ 19.07.2011. Слева – данные МАМЅ и их аппроксимация, справа – данные МАМЅ, пересчитанные в точку установки ДАКОНа.



Рис. 4в. Отрезок 4. Момент *t* = 0 соответствует: 07:46:40 ДМВ 19.07.2011.



Рис. 5а. Угловая скорость и угловое ускорение ТГК «Прогресс М-14М» в режиме солнечной закрутки. Момент *t* = 0 соответствует: 14:40:58 ДМВ 07.02.2014. Слева – компоненты угловой скорости, справа – компоненты углового ускорения.



Рис. 5б. Квазистатические микроускорения на борту ТГК «Прогресс М-14М»; слева – в точке (–5м, 0.5м, 0.5м), справа – в точке (–3.5м, 0.5м, 0.5м). Момент *t* = 0 соответствует: 16:09:45 ДМВ 01.11.2011.



Рис. 5в. Функции  $F_1(t), F_2(t)$  для точки (-5м, 0.5м, 0.5м). Оси X, Y датчика конвекции направлены соответственно: слева – по осям X, Y ТГК; в центре – по осям Y, Z ТГК; справа – по осям X, Z ТГК. Момент t = 0 соответствует: 16:09:45 ДМВ 01.11.2011.



Рис. 5г. Функции  $F_1(t), F_2(t)$  для точки (-3.5м, 0.5м, 0.5м). Оси X, Y датчика конвекции направлены соответственно: слева – по осям X, Y ТГК; в центре – по осям Y, Z ТГК; справа – по осям X, Z ТГК. Момент t = 0 соответствует: 16:09:45 ДМВ 01.11.2011.



Рис. 6. Движение ТГК «Прогресс M-14М» в режиме гравитационной ориентации. Момент времени *t* = 0 на графиках соответствует: (a) 14:40:58 ДМВ 07.02.2014, (б) 13:52:03 ДМВ 08.02.2014, (в) 14:22:26 ДМВ 09.02.2014.

28



Рис. 7а. Угловая скорость и угловое ускорение ТГК «Прогресс М-14М» в режиме гравитационной ориентации на отрезке 1. Момент *t* = 0 соответствует: 14:40:58 ДМВ 07.02.2014. Слева – компоненты угловой скорости, справа – компоненты углового ускорения.



Рис. 7б. Квазистатические микроускорения на борту ТГК на отрезке 1, слева – в точке (–5м, 0.5м, 0.5м), справа – в точке (–3.5м, 0.5м, 0.5м). Момент *t* = 0 соответствует: 14:40:58 ДМВ 07.02.2014.



Рис. 7в. Функции  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  для точки (-5м, 0.5м, 0.5м). Оси X, Y датчика конвекции направлены соответственно: слева – по осям X, Y ТГК; в центре – по осям Y, Z ТГК; справа – по осям X, Z ТГК. Момент t = 0 соответствует: 14:40:58 ДМВ 07.02.2014.



Рис. 7г. Функции  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  для точки (-3.5м, 0.5м, 0.5м). Оси X, Y датчика конвекции направлены соответственно: слева – по осям X, Y ТГК; в центре – по осям Y, Z ТГК; справа – по осям X, Z ТГК. Момент t = 0 соответствует: 14:40:58 ДМВ 07.02.2014.



Рис. 8а. Угловая скорость и угловое ускорение ТГК «Прогресс М-14М» в режиме гравитационной ориентации на отрезке 2. Момент *t* = 0 соответствует: 13:52:03 ДМВ 08.02.2014. Слева – компоненты угловой скорости, справа – компоненты углового ускорения.



Рис. 8б. Квазистатические микроускорения на борту ТГК на отрезке 2, слева – в точке (–5м, 0.5м, 0.5м), справа – в точке (–3.5 м, 0.5 м). Момент *t* = 0 соответствует: 13:52:03 ДМВ 08.02.2014.



Рис. 8в. Функции  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  для точки (-5м, 0.5м, 0.5м). Оси X, Y датчика конвекции направлены соответственно: слева – по осям X, Y ТГК; в центре – по осям Y, Z ТГК; справа – по осям X, Z ТГК. Момент t = 0 соответствует: 13:52:03 ДМВ 08.02.2014.



Рис. 8г. Функции  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  для точки (-3.5м, 0.5м, 0.5м). Оси X, Y датчика конвекции направлены соответственно: слева – по осям X, Y ТГК; в центре – по осям Y, Z ТГК; справа – по осям X, Z ТГК. Момент t = 0 соответствует: 13:52:03 ДМВ 08.02.2014.



Рис. 9а. Угловая скорость и угловое ускорение ТГК «Прогресс М-14М» в режиме гравитационной ориентации на отрезке 3. Момент *t* = 0 соответствует: 14:22:26 ДМВ 09.02.2014. Слева – компоненты угловой скорости, справа – компоненты углового ускорения.



Рис. 96. Квазистатические микроускорения на борту ТГК на отрезке 3, слева – в точке (–5м, 0.5м, 0.5м), справа – в точке (–3.5 м, 0.5 м). Момент *t* = 0 соответствует: 14:22:26 ДМВ 09.02.2014.



Рис. 9в. Функции  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  для точки (-5м, 0.5м, 0.5м). Оси X, Y датчика конвекции направлены соответственно: слева – по осям X, Y ТГК; в центре – по осям Y, Z ТГК; справа – по осям X, Z ТГК. Момент t = 0 соответствует: 14:22:26 ДМВ 09.02.2014.



Рис. 9г. Функции  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  для точки (-3.5м, 0.5м, 0.5м). Оси X, Y датчика конвекции направлены соответственно: слева – по осям X, Y ТГК; в центре – по осям Y, Z ТГК; справа – по осям X, Z ТГК. Момент t = 0 соответствует: 14:22:26 ДМВ 09.02.2014.