

УДК 629.78.018

Ю. А. Похил, А. М. Кислов, В. Г. Романенко, А. Я. Левин

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

КЭ «Пента—Усталость». Численное моделирование тепловых режимов блока циклического нагружения образцов в бортовой установке «Цикл-1»

Представлено 03.09.07

Наведено результати чисельного моделювання нестационарного температурного режиму блоку циклічного навантаження зразків різних матеріалів для двох варіантів конструктивної схеми в залежності від теплофізичних властивостей елементів конструкції та орбітальних умов космічного експерименту

ВВЕДЕНИЕ

Блок циклического нагружения (БЦН) входит в состав научной аппаратуры, которая устанавливается на внешней поверхности Международной космической станции (МКС) для проведения космического эксперимента «Пента — Усталость» [2, 3]. Целью эксперимента является исследование совместного влияния факторов космического пространства на циклическую долговечность материалов в условиях орбитального полета. Блок циклического нагружения предназначен для одновременных испытаний в идентичных внешних условиях партии плоских консольных образцов (8 шт.) из одного материала на циклический изгиб. Предполагаемая база испытаний составляет $5 \cdot 10^6$ циклов в течение примерно семи суток полета.

В работе для определенной модели орбитальных условий эксперимента проведено численное моделирование температурного режима элементов БЦН для двух вариантов его конструктивной схемы: с закрытыми в корпусе и открытыми

в космос держателями образцов. Исследовалась зависимость нестационарных температур элементов блока от их теплофизических и оптических характеристик. При этом одной из основных задач был выбор таких характеристик, при которых достигался максимальный перепад температуры образцов при прохождении освещенного и теневого участков рабочих витков орбиты. Получено, что по этому критерию имеет преимущество конструктивная схема с открытыми держателями образцов.

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ БЛОКА ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

В схеме БЦН с закрытыми в корпусе держателями образцов, приведенной на рис. 1, высота корпуса 215 мм, габаритный диаметр 225 мм, толщина стенки 1.5 мм. Дно корпуса имеет посадочные лапы для закрепления БЦН на установочной плите — диске диаметром 340 и толщиной 5 мм. Внутри корпуса к его дну 4 на

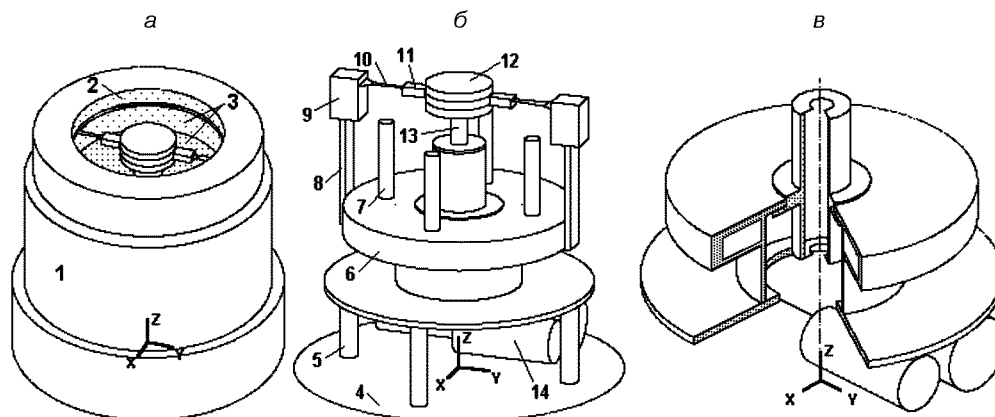


Рис. 1. Конструктивная схема БЦН с закрытыми держателями образцов: *a* -- вид снаружи (установочная плита не показана, 1 — корпус, 2, 3 — верхний и нижний тепловые экраны); *б* — внутренние элементы конструкции; *в* -- опорная платформа с приводом

трубчатых стойках 5 прикреплена опорная платформа 6, ее центральная продольная часть с цилиндрическим подшипником служит направляющей для штока 13. К верхней части платформы на трубчатых стойках 7 прикреплен тепловой экран 3. В нижней части платформы установлен электродвигатель с редуктором (привод 14); запуск двигателя возможен при условии, что его температура положительна.

По периметру верхнего основания опорной платформы установлены пластины — динамометры 8 (сталь 65Г). На верхних концах пластин закреплены восемь держателей 9, в которых защемлены неподвижные концы испытываемых образцов 10 (из сплава АМгб или ВТ-14) в виде фигурной пластины с участком равного сопротивления изгибу [3]. Вторым концом каждого из восьми образцов соединен подвижным защемлением 11 с роликом, входящим в паз захвата 12, который укреплен на верхнем конце штока 13. Шток через кривошипно-шатунный механизм связан с приводом и совершает возвратно-поступательное движение с частотой 10 Гц и амплитудой 5 мм. Тем самым обеспечивается симметричная нагрузка на образцы, которые должны испытываться на циклический изгиб с термоциклированием в условиях орбитального полета в течение семи суток.

В схеме БЦН с открытыми держателями образцов сняты верхняя часть корпуса и верхний

тепловой экран 2. Нижний экран 3 имеет тепловой контакт с корпусом. Материал пластин 8 заменен на сталь 60С2А с меньшим (почти вдвое) коэффициентом теплопроводности. Эти конструктивные изменения направлены на то, чтобы увеличить температурную амплитуду держателей и защемленных в них образцов на орбитальных участках свет — тень.

ПОСТАНОВКА И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

При проведении космического эксперимента (КЭ) необходимо обеспечить максимальный перепад освещенности образцов Солнцем на участках свет — тень рабочих витков орбиты. Выполнение этого условия существенно зависит от места установки БЦН на поверхности станции (температура посадочных мест, затенение элементами станции, собственное излучение этих элементов), а также от параметров орбиты и ориентации МКС.

Для расчетной оценки тепловых режимов БЦН в орбитальном полете принимается, что он установлен на штанге — удлинителе, при этом элементы станции не влияют на тепловой режим блока. На основании имеющихся данных о реальных параметрах орбиты, ориентации и условиях освещенности МКС в течение нескольких последних лет принимаем, что орбита стан-

ции является круговой с параметрами: высота $H \approx 345\text{--}350$ км, наклонение $i = 51.65^\circ$, период обращения $P \approx 91.5$ мин. Восходящий узел орбиты из-за вековых возмущений смещается на угол $\Delta\Omega \approx -5.1^\circ$ в сутки, в результате чего с течением времени изменяется угол β между плоскостью орбиты и вектором направления на Солнце, а вместе с ним — условия освещенности Солнцем элементов станции и БЦН.

Чтобы обеспечить максимальный перепад освещенности испытываемых образцов, сеанс КЭ необходимо проводить на витках, для которых Солнце находится вблизи плоскости орбиты. Проведенные оценки показывают, что для принятых параметров орбиты имеются в течение года 10—12 примерно 7-суточных «окон», когда $|\beta| \leq (15\dots 16^\circ)$. Сеанс КЭ нужно начинать за 3.5 сут до момента времени, когда достигается значение $\beta = 0$. В качестве основного рассматривается вариант орбитальной ориентации БЦН, при которой ось $+Z$ направлена в зенит, и на теневых участках рабочих витков на образцы не падает поток излучения от Земли.

Моделирование тепловых режимов БЦН проводилось для витка орбиты с долгой восходящего узла $\Omega = 12^h$ на дату весеннего равноденствия 2006 г. Принималось, что солнечная постоянная $SC = 1380$ Вт/м² (на заданную дату), плотность потока собственного излучения Земли 230 Вт/м² и альbedo 0.32 [http://www.tak2000.com/data/planets/earth.htm]. Время пребывания БЦН в тени Земли и на освещенном участке витка составляет примерно 36 и 55 мин.

Для выбранных орбитальных условий проведения КЭ ставились такие основные задачи численного моделирования тепловых режимов блока циклического нагружения.

1. Исследование нестационарного температурного поля в системе элементов БЦН в зависимости от конструктивной и тепловой схемы, теплофизических и термооптических (α_s , ε) характеристик элементов.

2. Выбор конструктивной и тепловой схем, обеспечивающих максимальный перепад температуры испытываемых образцов в сеансе КЭ.

3. Анализ температурного режима элементов привода и разработка тепловой схемы узла привода, которая обеспечивает в сеансе КЭ допустимый диапазон рабочих температур двигателя с учетом требования, что при запуске его тем-

пература должна быть положительной.

Температурный режим системы элементов БЦН определяется с учетом совместного действия излучения, теплопроводности и всей совокупности тепловых взаимосвязей между элементами при воздействии прямого излучения Солнца, потоков собственного и отраженного солнечного излучения от Земли, а также внутренних тепловыделений, обусловленных работой привода. Мощность тепловыделения в приводе составляет 6 Вт, в подшипнике штока — 2 Вт и, предположительно, до 0.1 Вт в образце за счет циклической изгибной деформации.

Для начальной сравнительной оценки различных вариантов конструктивной и тепловой схем принимается, что температурное поле системы «установочная плита — корпус БЦН» осесимметрично относительно оси Z . При расчете теплового режима для выбранного варианта схемы БЦН учитывается зависимость температуры корпуса от угловой координаты.

Тепловая схема системы строится на основе модели сосредоточенных параметров. Цилиндрические элементы и пластины имитируются стержнями постоянного поперечного сечения, а диски (кольца) и испытываемые образцы материалов — стержнями переменного сечения. Узел опорной платформы, двигателя и редуктора, имеющий сложную пространственную конфигурацию, рассматривается в каждый момент времени как тело с однородной температурой, так как по расчетной оценке для этого узла число $Bi \ll 1$.

Численное моделирование тепловых режимов БЦН проводилось с использованием программ OASIS и ANTRES пакета TRASSA-2 [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты температурного режима элементов БЦН с закрытыми держателями образцов проведены для ряда вариантов оптических характеристик поверхностей при работающем и неработающем приводе и тепловыделении в образцах $Q_o = 0$ и 0.1 Вт. Для системы «установочная плита, внешняя поверхность корпуса — внутренние поверхности корпуса и тепловых экранов» рассматривались комбинации термооптических параметров:

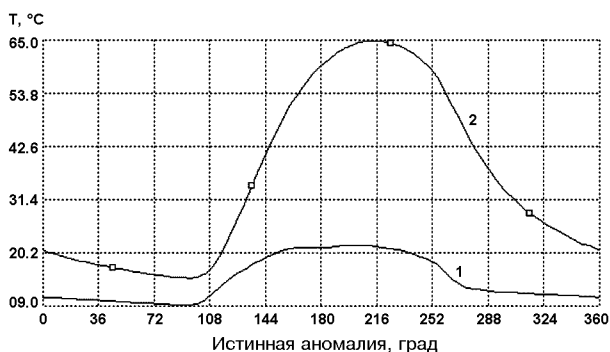


Рис. 2. Изменение температуры образцов на витке (при собственном тепловыделении 0.1 Вт): 1 — образец из АМг6, 2 — образец из ВТ-14

- 1) $\epsilon = \alpha_s = 0.9 - \epsilon = 0.2$;
- 2) $\epsilon = 0.9, \alpha_s = 0.25 - \epsilon = 0.9$;
- 3) $\epsilon = 0.9, \alpha_s = 0.25 - \epsilon = 0.2$.

Для полированных внешней поверхности тепловых экранов и поверхностей образца принимались $\epsilon = 0.1, \alpha_s = 0.15$; для внутренних элементов системы $\epsilon = 0.2-0.4$.

Для рассмотренных вариантов при работающем приводе и $Q_0 = 0$ размах температуры образцов из АМг6 и ВТ-14 составляет за виток примерно 13 °С и 50 °С. Оптимальным будем считать вариант 2 термооптических параметров, поскольку для него температура образцов из ВТ-14 принимает отрицательные и положительные значения. Диапазон изменения температуры основных элементов на витке: +7 ... +20 °С (образец из АМг6) и -10 ... +42 °С (ВТ-14), -46... -16 °С (корпус), -36 ... -15 °С (установочная плита), +14 ... +17 °С (опорная платформа с приводом), -14 ... +16 °С (тепловой экран).

На рис. 2 приведен график изменения температуры образцов при собственном тепловыделении в них $Q_0 = 0.1$ Вт. Видно, что тепловыделение повышает температурный уровень, но не амплитуду температуры.

В режиме ожидания БЦН на орбите неработающий двигатель имеет отрицательную температуру (-39 ... -36 °С), и не может быть включен. Для повышения температуры двигателя и всего привода до положительных значений перед сеансом КЭ предлагается использовать нагреватель мощностью 10 Вт; за 2-3 витка температура повышается до +2...+10 °С.

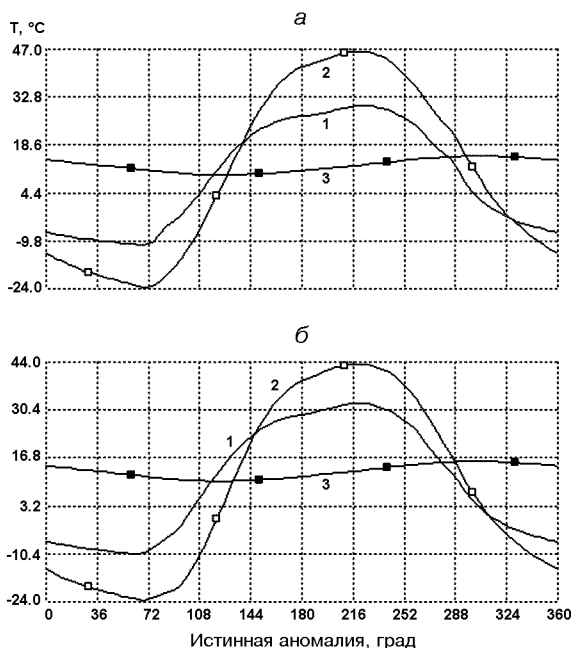


Рис. 3. Температура элементов БЦН на витке (1 — образец АМг6, 2 — образец ВТ-14, 3 — опорная платформа и привод): а — угол $\beta = 0$, б — через 3.5 сут ($\beta \approx 16^\circ$)

Результаты расчета температуры основных элементов БЦН с открытыми держателями образцов в рабочем режиме при $Q_0 = 0$ приведены на рис. 3. Диапазон температуры образцов АМг6 и ВТ-14 составляет -11 ... +30 °С и -23 ... +48 °С на витке орбиты, для которого угол $\beta = 0$. Через 3.5 сут, когда $\beta \approx 16^\circ$, температура образцов на витке изменяется в диапазоне -10 ... +32 °С и -24 ... +44 °С. Таким образом, для этого варианта схемы БЦН диапазон термоциклирования образцов существенно больше, чем для схемы с закрытыми держателями. Температура других элементов: +10 ... +16 °С (привод), -36 ... -14 °С (корпус, тепловой экран), -33 ... -14 °С (установочная плита). При неработающем приводе температура двигателя -30 ... -24 °С.

В результате расчета температурного диапазона образцов при тепловыделении в них $Q_0 = 0.1$ и 0.2 Вт получено, что повышается средняя температура образцов при слабом изменении амплитуды. Для образца из сравнительно высокопроводящего сплава АМг6 средняя температура повышается примерно на 2 и 6 °С относительно ее значения при $Q_0 = 0$; в образце из

низкотеплопроводного сплава ВТ-14 средняя температура повышается на 24 и 48 °С.

Проведены уточненные расчеты температуры элементов БЦН на витке с учетом того, что освещенность и температура корпуса зависят от угловой координаты. Получено, что эта неоднородность практически не влияет на температуру элементов блока.

1. Гаврилов Р. В., Похил Ю. А., Яковенко Л. Ф. и др. Исследование влияния ФКП на циклическую долговечность материалов в условиях реального космического полета. КЭ «Пента—Усталость» // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 33—39.
2. Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Романенко В. Г., Фенченко В. Н. Пакет программ TRASSA для расчета тепловых режимов космических аппаратов // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 4.—С. 1—14.

3. Похил Ю. А., Гаврилов Р. В., Яковенко Л. Ф. и др. Научная аппаратура и материалы для реализации КЭ «Пента—Усталость» // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 1.—С. 3—11.

**SPACE EXPERIMENT «PENTA — FATIGUE».
NUMERICAL MODELING CONDITIONS FOR CYCLIC
LOADING UNIT OF SAMPLES IN ON-BOARD
FACILITY «CYCLE-1»**

*Yu. A. Pokhyl, A. M. Kislov, V. G. Romanenko,
A. Ya. Levin*

The results of numerical modeling of a non-stationary temperature condition of the cyclic loading unit of various materials samples for two variants of the constructive schemes are given depending on thermal-physical properties of structure elements and orbital conditions of space experiment