

4. Stepanov, G. Yu. Hydrodynamics of Turbo-Machine Cascades / G. Yu. Stepanov. Moscow : Fizmatgiz, 1962.

5. Turchak, L. I. Fundamentals of Numerical Methods / L. I. Turchak. Moscow : Nauka, 1987.

Е. М. Краева

К РАСЧЕТУ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ В КАНАЛАХ МАЛОРАСХОДНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Для расчета использована система уравнений импульсов турбулентного пограничного слоя в проекциях на оси цилиндрических координат. При принятых допущениях о характере движения ядра потока выполнены преобразования и проведено интегрирование уравнений. Полученные теоретические результаты сравниваются с эмпирическими.

Ключевые слова: момент сопротивления, высокооборотный, малорасходный, центробежный насос.

© Краева Е. М., 2009

УДК:629.78.015

Ю. М. Ермошкин, С. А. Орлов, А. Ю. Усанов

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СИЛЬФОННЫХ БАКОВ

Рассматриваются вопросы формирования режимов квалификационных и приемочных испытаний сильфонных баков на механические нагрузки, анализируются методические ошибки, выявленные в процессе проведения испытаний.

Ключевые слова: космический аппарат, бак, блок хранения и подачи, механические испытания, резонанс.

В монотопливных двигательных установках отечественных космических аппаратов (КА) уже на протяжении нескольких десятков лет успешно применяются блоки хранения и подачи топлива (БХП) на основе сильфонных баков. Для использования БХП в составе КА нового поколения (с иными уровнями механических нагрузок) возникла необходимость проведения его доквалификации на механические воздействия.

Объем наземной экспериментальной отработки и приемных испытаний оборудования КА на механические воздействия включает испытания на линейные, вибрационные, ударные воздействия [1; 2]. Режимы нагружения формируются из анализа условий эксплуатации оборудования, его массы и местоположения на КА.

Предприятие-изготовитель БХП покупает готовые баки у другого изготовителя, оснащает его дополнительным оборудованием, в результате чего появляется БХП как элемент двигательной подсистемы КА.

При проведении доводочных испытаний БХП на механические воздействия произошло разрушение сильфонов двух баков (по внешнему сварному шву гофра). При этом разрушение произошло не в околосшовной зоне, как это обычно бывает, если шов качественный, а непосредственно по шву, что указывает на недостаточное качество соединения. Необходимо отметить, что в данной конструкции бака сварные соединения являются критическим элементом, определяющим прочность всей конструкции, так как толщина свариваемых деталей мала, а

общая длина швов достигает сотен метров. Однако все поставленные для комплектации БХП баки успешно прошли приемочные испытания на заводе-изготовителе.

Для установления причины разрушения сильфонов баков, формирования режимов квалификационных и приемочных испытаний были проведены дополнительные испытания двух БХП на механические нагрузки. Настоящая работа посвящена анализу результатов данных испытаний и выявлению возможных методических ошибок, не позволивших выявить дефекты изготовления в процессе проведения приемочных испытаний баков.

В процессе проведения испытаний необходимо было решить комплекс взаимодополняющих задач:

- выявить причины разрушения сильфона бака;
- разработать методики определения низших собственных частот сильфона, находящегося внутри корпуса бака;
- оценить влияния методики проведения испытаний на результаты испытаний;
- подтвердить или исключить влияния оборудования (оснастки, приспособлений, системы управления и т. д.) на результаты испытаний;
- уточнить режимы квалификационных и приемочных испытаний бака и БХП.

Испытания включали следующие виды воздействий:

- поиск резонансов в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц с уровнями 0,5 g и скоростью сканирования 2 окт/мин;

- испытания на гармоническую вибрацию в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц с уровнями от 1 до 12 g;
- испытания на широкополосную случайную вибрацию в диапазоне частот от 20 Гц до 2 кГц с уровнями от 0,02 до 0,2 g²/Гц;
- испытания на квазистатические нагрузки с уровнями ±10 g;
- ударные испытания с уровнями ±40 g.

Режимы испытаний были сформированы, исходя из условий эксплуатации БХП в составе КА, отечественной методической литературы [3; 4] и полностью согласованы с требованиями, представленными в источниках [1; 2]. Испытания проводились в несколько этапов с изменением уровней и длительности воздействий. При проведении испытаний на заводе-изготовителе БХП использовалось следующее оборудование:

- центрифуга Ц-100;
- стенд ударных испытаний СТ-800;
- вибрационный стенд LDS V894/440.

Предварительно была проведена аттестация испытательного оборудования и оснастки.

Минимальные собственные частоты оснастки находятся в области частот ~1000 Гц. Все оборудование соответствовало требованиям нормативной документации по точностям задания режимов испытаний и обеспечивало нагружение БХП и проведение измерений с отклонениями не превышающими:

- по амплитуде виброускорения ±10 %;
- уровню спектральной плотности виброускорения ±6 дБ;
- частоте вибрации ±2 % в диапазоне частот 5–2000 Гц;
- среднеквадратическому значению виброускорения ±4 %;
- величине ударного ускорения ±15 %;
- величине линейного ускорения ±10 %.

Описание конструкции бака.

Для дальнейшего анализа и установления причин разрушения сиффона рассмотрим конструкцию сиффонного бака (рис. 1). Бака состоит из цилиндрического корпуса 1 со сферическими днищами 2. С одной из сторон по торцу цилиндра 1 приварен сиффон 3. На свободном

торце сиффона установлено фторопластовое кольцо 4, обеспечивающее скольжение сиффона по корпусу 1 в осевом направлении, но ограничивающее его перемещение в боковых направлениях. Между корпусом и сиффоном имеется минимальный зазор 5. Со стороны фторопластового кольца 4 в сферическом днище образована газовая полость 6. Сиффон при испытаниях заполнен имитатором топлива (водой).

Уже по результатам первых этапов испытаний стало понятно, что ударные и квазистатические воздействия (линейные нагрузки) не могут быть причиной повреждения БХП, так как даже разрушившиеся баки эти нагрузки выдержали без потери герметичности сиффона. Эти результаты подтверждают расчетные оценки напряжений на элементах бака, которые показали, что максимальные напряжения в сиффоне при заданных нагружениях должны быть в 8–10 раз меньше допустимых.

До начала испытаний также была проведена оценка нижних собственных частот сиффона и бака. Численное значение низшей частоты сиффона составило 8 Гц. Оценка напряжений и собственных частот сиффона проводилась по методике [5]. Оценка низшей собственной частоты корпуса бака, выполненная по методике [6], составила величину ~300 Гц. Собственные частоты арматуры БХП (точки контроля 1, 2, 4, 7) находятся в области частот 150–500 Гц (эти результаты были получены при более ранних испытаниях БХП). Таким образом, оснастка с собственными частотами выше 1 000 Гц не могла оказать влияния на прочность низкочастотного сиффона, а также отклики корпусных частот бака и арматуры. Поэтому основное внимание было уделено анализу режимов вибрационного нагружения БХП и методики их реализации.

Места установки акселерометров на корпусе бака для регистрации ускорений при проведении вибрационных испытаний (точки без индексов означают регистрацию ускорений в трех направлениях) изображены на рис. 2.

Целью первого этапа испытаний было определение низших собственных частот сиффона. Так как непосредственное измерение частоты на заправленном сиффоне в герметичном баке под давлением выполнить невозможно, то экспериментальные данные о собственной частоте

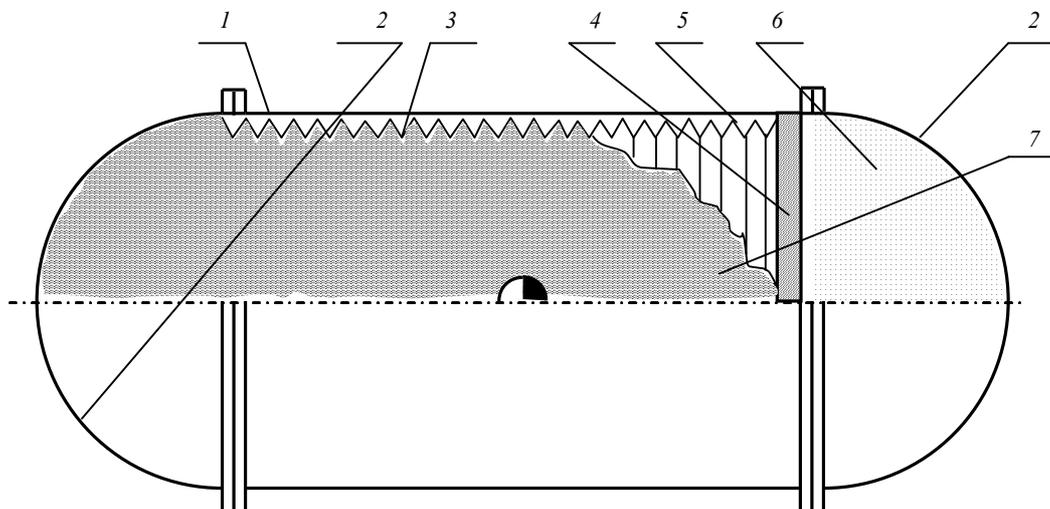


Рис. 1. Принципиальная схема бака

те сильфона получали методом косвенных измерений. Для обоснования возможности таких измерений на одном из образцов БХП в области датчика 5Y на корпусе был выполнен сквозной паз, и на сильфон был установлен вибрационный датчик в плоскости нахождения датчиков 5. При вибрационном нагружении данного БХП по методу качающейся частоты [4] (скорость сканирования 0,6 окт/мин и уровень нагружения 0,5 g) датчик на сильфоне и датчики 5Y, 5Ya, 5Z показали наличие резонансов на одних и тех же частотах. Таким образом, по показаниям датчиков 5Y, 5Ya, 5Z можно судить о собственных частотах сильфона БХП. Этот эффект легко объясняется тем, что между сильфоном и корпусом бака зазор составляет малую величину (~1 мм), и при возникновении резонансных явлений сильфон соударяется с корпусом бака с частотой резонанса, что и регистрируют датчики, установленные на корпусе.

Следующий этап испытаний заключался в определении нижней собственной частоты заправленного сильфона в составе БХП. Испытания проводились с разными скоростями сканирования по частоте (2 и 0,5–0,6 окт/мин).

Частотные испытания БХП с заполненным баком, проведенные со скоростью сканирования 2 окт/мин, показали отсутствие резонансных частот до 17 Гц (рис. 3). Таким образом, согласно общепринятым методикам, например, проводить вибрационные испытания можно с частоты 10 Гц [7]. Такой подход был реализован на заводе-изготовителе бака при проведении контрольно-выборочных и приемочных испытаний.

Однако (рис. 4), при уменьшении скорости прохождения низкочастотного диапазона до 0,5–0,6 окт/мин в частотном диапазоне 7–8 Гц появился резонанс (увеличение амплитуды колебаний в 2–4 раза), который на рис. 3 отсутствует.

Этот эффект можно объяснить следующим образом: наличие в сильфоне большой массы жидкости делает его достаточно инерционным. При скорости 2 окт/мин резонансы не успевают развиваться, что ошибочно принимает-

ся при анализе таких виброграмм за отсутствие резонансов вообще. Однако при уменьшении скорости до 0,6 окт/мин успевают возникнуть колебания массы жидкости и сильфона в низкочастотной области (резонанс).

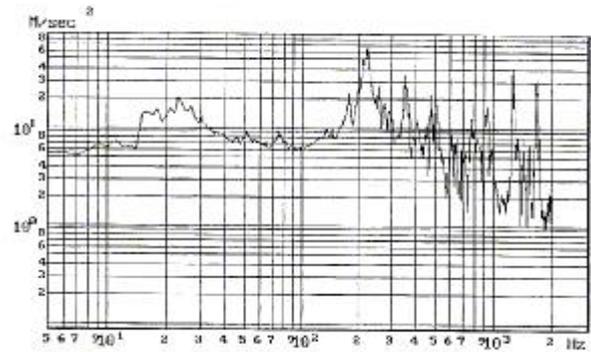


Рис. 3. Ускорение в точке 5Ya при частотных испытаниях со скоростью сканирования 2 окт/мин

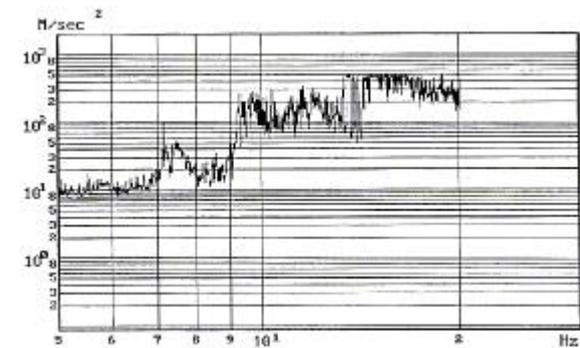


Рис. 4. Ускорение в точке 5Ya при вибрационных испытаниях со скоростью сканирования 0,6 окт/мин

Следует отметить, что на заводе-изготовителе бака предусматривались вибрационные испытания по методу ступенчатого изменения амплитуды ускорения для каждого поддиапазона частот от 10 до 2 000 Гц.

В то же время, на заводе изготовителе БХП методика испытаний заключалась в плавном изменении частоты

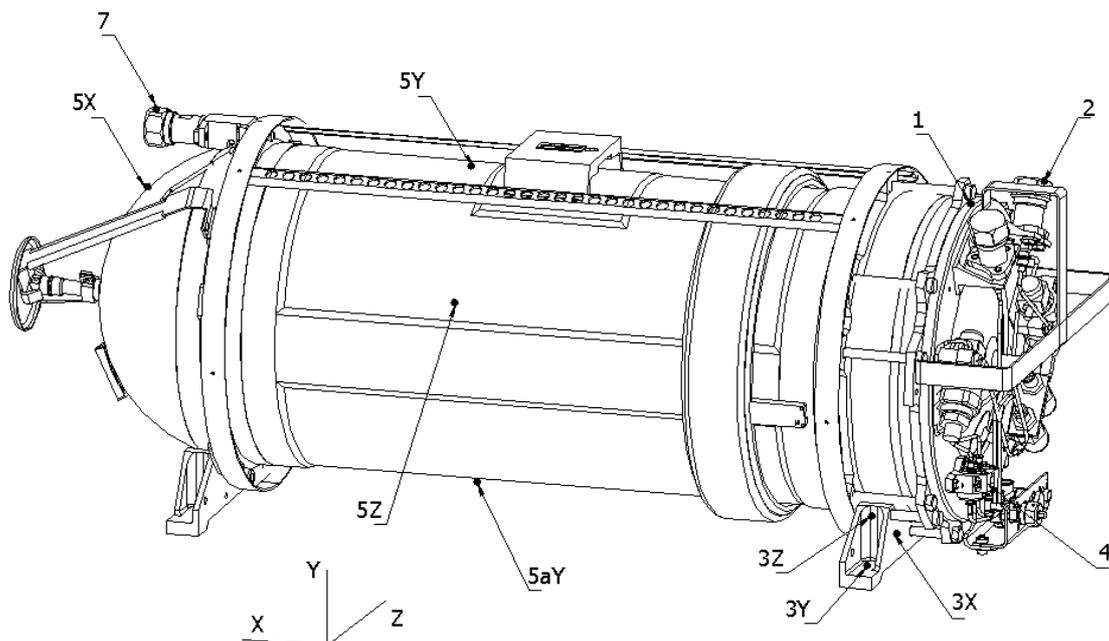


Рис. 2. Схема установки вибродатчиков на БХП при испытаниях

от нижней границы в 5 Гц к верхней в 2 000 Гц с плавным же изменением амплитуды ускорений от 1 до 12 g (метод качающейся частоты). Также проводились испытания на широкополосную случайную вибрацию, эквивалентную гармонической, с уровнем до 0,2 g²/Гц.

Выявленные отличия в методиках испытаний бака и БХП потребовали дополнительного анализа. Проведение испытаний с частоты 10 Гц исключает нагружение сильфона с максимальными деформациями в области резонансных частот 7–8 Гц, так как амплитуда перемещения обратно пропорциональна квадрату частоты [7]. Дополнительно к этому, при ступенчатом увеличении амплитуды нагружения после прохождения октавного диапазона происходит остановка вибростенда и выполняется перенастройка системы управления на новый уровень. Это приводит к затуханию возникших колебаний, и при прохождении следующего частотного диапазона требуются значительные затраты энергии, чтобы вновь вызвать колебания сильфона с жидкостью.

Справедливость данного утверждения подтверждается графиками отклика точки 5Ya при проведении испытаний БХП на случайную вибрацию (рис. 5, 6). Нижняя граница частотного диапазона составляла 20 Гц, и при проведении испытаний с уровнями воздействий до 0,05–0,07 g²/Гц (рис. 5) в диапазоне частот до 20 Гц отклик находился на уровне шумов. Но с увеличением уровня воздействия до 0,2 g²/Гц (рис. 6) энергии, закачиваемой в сильфон, оказалось достаточно для возбуждения низкочастотных колебаний даже в диапазоне частот, который был исключен из нагружения (ниже 20 Гц).

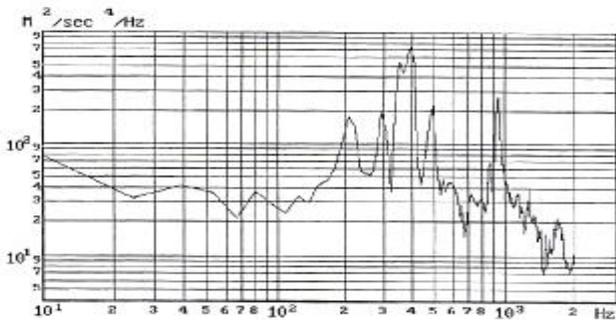


Рис. 5. Ускорение в точке 5Ya при испытаниях на широкополосную случайную вибрацию с уровнями до 0,07 g²/Гц

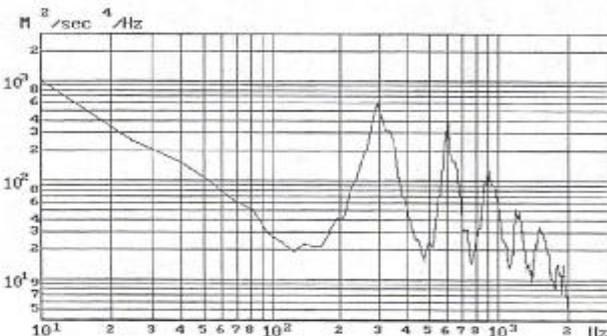


Рис. 6. Ускорение в точке 5Ya при испытаниях на широкополосную случайную вибрацию с уровнями до 0,2 g²/Гц

Отсюда становится понятно, что непосредственной причиной разрушения сильфона могут быть вибрационные нагрузки в низкочастотной области (до 10 Гц), воздействующие на участки швов сильфона с недостаточным качеством сварки.

Так как вибрационные воздействия в диапазоне частот до 10 Гц не используются при квалификационных, приемочных и контрольно-выборочных испытаниях (КВИ) бака на заводе-изготовителе, то дефекты сварки на этих испытаниях не выявлялись.

Испытания по методу качающейся частоты (нижняя граница частоты 5 Гц), применяемые у изготовителя БХП, ужесточают нагружение сильфона по сравнению с испытаниями по методу ступенчатого изменения амплитуды ускорения по поддиапазнам частот. Поэтому скрытые дефекты сварки швов выявились только на этапе испытаний БХП.

Отметим, что метод ступенчатого изменения амплитуды виброускорения применялся в 60–70-х гг прошлого века. В настоящее время, с появлением цифровых систем управления в стандартах ESA и NASA [1; 2], этот метод не рекомендуется к применению.

Таким образом, более качественная методика проведения вибрационных испытаний позволяет выявлять дефекты сварки сильфона. При этом следует заметить, что на заводе-изготовителе бака формально не были нарушены требования существующей нормативной документации на проведение испытаний. Но применяемая методика приемочных испытаний и КВИ фактически не позволила обнаружить дефекты изготовления сильфона.

Вместе с тем, анализ показывает, что в области средних и высоких частот наиболее близкой к реальному нагружению БХП в составе КА (по своему физическому воздействию) является широкополосная случайная вибрация, как отклик конструкции КА на акустические воздействия на участке выведения [1; 2; 7; 8]. Широкополосная случайная вибрация (ШСВ) позволяет проводить нагружение БХП в широком амплитудном и частотном диапазонах, не повреждая качественно изготовленное оборудование (рис. 6).

Исходя из сказанного выше, можно сделать следующие выводы и дать рекомендации:

- наиболее вероятной причиной разрушения сильфона бака при механических испытаниях БХП явилось недостаточное качество сварных соединений гофр сильфона, не выявленное на заводе-изготовителе бака, в сочетании с повышенными нагрузками при возникновении резонанса в низкочастотной области (5–8 Гц);
- при проведении приемочных испытаний и КВИ бака на заводе-изготовителе для надежного выявления скрытых дефектов сварки сильфона целесообразно использовать испытания на гармоническую вибрацию в низкочастотном диапазоне от 5 до 100 Гц (но не менее 5–20 Гц) по методу качающейся частоты со скоростью сканирования не выше 0,5–0,6 окт/мин;
- на заводе изготовителе БХП при приемочных испытаниях целесообразно применять широкополосную случайную вибрацию с уровнями 0,05–0,07 g²/Гц, а при квалификационных испытаниях – гармоническую вибрацию в низкочастотном диапазоне и широкополосную случайную вибрацию с уровнями до 0,2 g²/Гц.

Библиографический список

1. Product verification requirements for launch, upper-stage and space vehicles // MIL-STD-1540D. 15 January 1999.
2. Space engineering. Testing // ECSS-E10-03A. 15 February 2002.
3. Вибрации в технике : справ. Т. 5. Измерения и испытания / подред. М. Д. Генкина. М. : Машиностроение, 1981.
4. Испытательная техника : справ. Т. 2 / под ред. В. В. Ключева. М. : Машиностроение, 1982.
5. Сапожков, В. М. Прочность и испытания трубопроводов гидросистем самолетов и вертолетов / В. М. Сапожков, Г. С. Лагосюк. М. : Машиностроение, 1973.
6. Кан, С. Н. Строительная механика оболочек / С. Н. Кан. М. : Машиностроение. 1966.
7. Ленк, А. Механические испытания приборов и аппаратов / А. Ленк, Ю. Ренитц. М. : Мир, 1976.
8. Гладкий, В. Ф. Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата / В. Ф. Гладкий. М. : Главная редакция физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1975.

Yu. M. Yermoshkin, S. A. Orlov, A. Yu. Usanov

CREATION OF THE FUEL SILPHON TANKS MECHANICAL TEST MODES

The fuel silphon tanks mechanical qualification and acceptance tests modes are researched. The methodical mistakes taking place during tests are analyzed.

Keyword: spacecraft, tank, storage and feed unit, mechanical tests, resonance.

© Ермошкин Ю. М., Орлов С. А., Усанов А. Ю., 2009