

УДК 629.78.001.2

© Сарокваша П.Ю., Тарасов Ю.Л., Шулепов А.И., Глушков С.В.
Sarokvasha P.Y., Tarasov Y.L., Shulepov A.I., Glushkov S.V.

РАЗМЕЩЕНИЕ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЁТОМ ВИБРАЦИОННОГО НАГРУЖЕНИЯ

SMALL SPACECRAFT ALLOCATION WITH ALLOWANCE FOR VIBRATIONAL LOADING

Аннотация. Рассмотрены аспекты обоснования возможности запуска малых космических аппаратов при попутных (сопутствующих) научных экспериментах на борту базовых проблемно-ориентированных космических аппаратов или на переходном отсеке последней ступени ракеты-носителя, создаваемых в Государственном научно-производственном ракетно-космическом центре «ЦСКБ-Прогресс» (ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»). Предложен алгоритм оценки возможности размещения малого космического аппарата с учётом вибрационного нагружения на участке старта и выведения.

Annotation. Basis aspects for the possibility of launching small spacecrafts with the accompanying science experiments on boards of basic problem-orientated spacecrafts or in adapter module of the ejection stage of the satellite rocket produced by State science-manufacturing rocket space center TsSKB Progress are described in the article. Pro-posed evaluating algorithm for the possibility of small spacecraft allocation considering vibrational loading during launch and insertion stages.

Ключевые слова. Попутный (сопутствующий), эксперимент, присоединённая масса, виброускорение, контейнер, малый спутник.

Key words. Accompanying, experiment; associated mass; vibration acceleration; container; small satellite.

В настоящее время большое распространение получило решение задач по исследованию фактора космического пространства с помощью малогабаритных космических аппаратов (МКА). Последние могут доставляться на рабочие орбиты в виде присоединённой массы, совместно со значительно большими по массе (в сотни, тысячи раз и более) основными проблемно-ориентированными КА, выводимыми ракетой-носителем. Такие МКА размещаются в свободных объёмах внутри переходных отсеков (ПО) последних ступеней РН или на поверхности КА.

При отработке российским ракетоносителем активного участка в условиях старта и при действии пульсаций акустического давления в зонах $M_{кр}$ и q_{max} при помощи замеров был зафиксирован высокий уровень аку-

стического давления на поверхности бортового оборудования, расположенного в местах переходного (ПО) и межбакового отсеков III ступени.

Для выполнения исследования возможности размещения присоединённой массы в виде малого космического аппарата была проведена оценка изменения акустического нагружения в случае отстройки от режима резонанса путем рационального выбора присоединённой массы колеблющейся системы.

Измерение уровня акустического давления производилось в шести точках снаружи по обшивке на этапе выведения РН «Союз-2-3». Сведения о расположении датчиков давления приведены в табл.1 и на рис. 1. Фактический диапазон измерений по частоте для всех акустических параметров – от 30 до 2000 Гц.

Сарокваша Петр Юрьевич – аспирант СГАУ, тел. +7(846)267-45-20.

Тарасов Юрий Леонидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СГАУ;

Шулепов Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент СГАУ;

Глушков Сергей Васильевич – аспирант СГАУ.

Sarokvasha Peter Jurievich – postgraduate of SSAU, tel. +7(846)267-45-20.

Tarasov Yuri Leonidovich – Dr. Sci. Tech., the professor, chief of department SSAU,

Shulepov Alexander Ivanovich – Ph.D. of technical sciences, associate professor of SSAU.

Glushkov S.V. – postgraduate of SSAU.

Таблица 1

Перечень акустических параметров

Индекс параметра	Место установки
АИН2	Снаружи отсека в районе стыковочного шпангоута 1 (в зоне ~ 45° от пл. II к пл. III)
АИН3	Снаружи межбакового отсека с нижней юбкой бака «Г» (в зоне ~ 45° от пл. II к пл. III)
АИН4	Снаружи отсека на расстоянии 600 мм от стыка с нижней юбкой бака «Г» (по пл. III)
АИН5	Снаружи отсека на расстоянии 600 мм от стыка с нижней юбкой бака «Г» (в зоне ~ 45° от пл. III к пл. IV)
АИН6	Снаружи отсека на расстоянии 600 мм от стыка с нижней юбкой бака «Г» (в зоне ~ 45° от пл. IV к пл. I)
АИН8	Снаружи отсека на расстоянии 600 мм от стыка с нижней юбкой бака «Г» (по пл. I)

С помощью представленных выше датчиков были получены зависимости акустического давления от времени в диапазоне от минус 10 до 130 секунды с частотой 8000 измерений в секунду (отсчет времени проводится с момента старта).

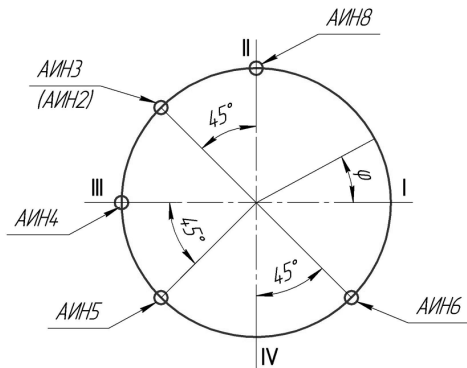


Рис. 1 Схема расположения датчиков акустического давления

Исходя из объема имеющихся экспериментальных данных по нагрузке, при моделировании акустического воздействия для каждого момента времени были приняты следующие допущения:

- в окружном направлении в плоскости поперечного сечения, в которой расположены пять датчиков АИН3...АИН6, АИН8, использовалась линейная интерполяция давления по значениям, полученным в этих датчиках (рис. 2);
- в осевом направлении между двумя плоскостями – плоскостью расположения датчиков АИН3...АИН6, АИН8 и плоскостью стыковочного шпангоута 1 (где расположен датчик АИН2) – давление изменяется по линейному закону с наклоном, определяемым по показаниям датчиков АИН2 и АИН3 (рис.3);

- на участке обшивки выше плоскости расположения датчиков АИН3...АИН6, АИН8 давление считается постоянным в осевом направлении, а в окружном – соответствует показаниям датчиков АИН3...АИН6, АИН8;

- на участке обшивки ниже плоскости стыковочного шпангоута 1 уровень давления также считается постоянным в осевом направлении, а в окружном – соответствует уровню давления, определенному в плоскости стыковочного шпангоута 1.

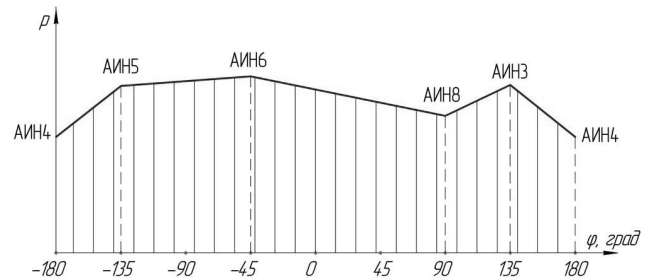


Рис. 2. Линейная аппроксимация давления в окружном направлении

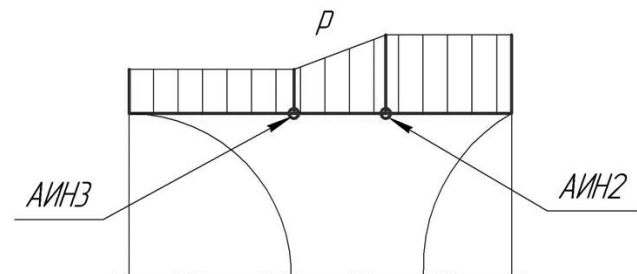


Рис. 3. Аппроксимация давления в осевом направлении

Акустическое давление изменяется как по наружной поверхности обшивки, так и во времени. Следует отметить, что в системе MSC.Patran для задания измене-

ния нагрузок использовались поля (Fields). Они позволяют определять зависимость нагрузки либо от пространственных координат (пространственные поля – Spatial fields), либо от времени (непространственные поля – Non-spatial fields). Поэтому вся наружная поверхность отсека была разделена на 96 отдельных участков (16 делений в окружном и шесть в осевом направлении), в пределах которых акустическое давление в каждый момент времени принимается постоянным (рис. 4 и 5).

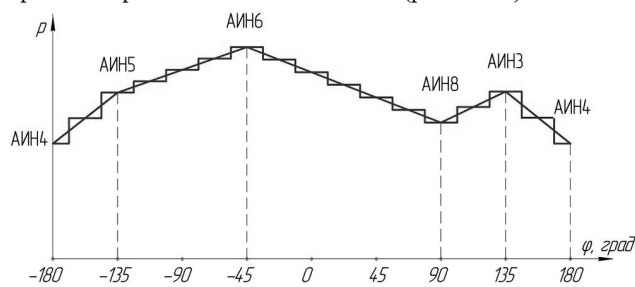


Рис. 4 – Изменение давления в окружном направлении

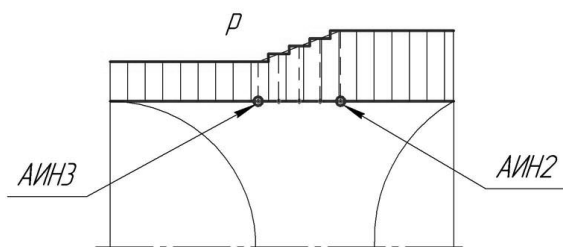


Рис. 5. Изменение давления в осевом направлении

Для каждого из участков создана отдельная зависимость акустического давления от времени (поле Non-spatial).

Ввиду большой трудоемкости расчет производился не для всего диапазона времени натурных испытаний, а только для участка от 55 до 65 секунды. В указанный промежуток времени зафиксированы наибольший уровень акустического давления (55–59 с) и максимальные величины амплитуд ускорений (60–65 с). При этом в интервале от 55 до 60 с размер шага по времени принимался равным 0,0003125 с, а в интервале 60–65 с – 0,00025 с.

Следует отметить, что в пакете MSC.Patran/Nastran отсутствует возможность рестарта при выполнении динамического анализа. Поэтому размер шага по времени выбирался исходя из доступных вычислительных ресурсов.

В МКЭ-пакете MSC.Nastran демпфирующие свойства конструкции описываются при помощи коэффициента конструкционного демпфирования (Structural damping coefficient) G [1, 2].

Коэффициент конструкционного демпфирования G был выражен через процент снижения свободных

колебаний за один период α по следующей формуле:

$$G = \frac{2\alpha}{100}$$

Коэффициент α связан с логарифмическим декрементом затухания как

$$\alpha = (1 - e^{-\beta}) \cdot 100\%$$

Согласно статистике логарифмический декремент затухания β равен 0,3. Тогда $\alpha = 26\%$, а $G = 0,52$.

В программе MSC.Nastarn реализованы два метода решения уравнений динамической системы:

- Direct Transient (прямой переходный анализ) основан на непосредственном интегрировании уравнений динамики по времени;
- Modal Transient (модальный переходный анализ) использует разложение вектора узловых перемещений в ряд по формам собственных колебаний (также называемых модами).

В прямом методе демпфирование задавалось путем ввода единственного значения коэффициента G и эффективной частоты колебаний ω_3 (в рад/с), при которой происходит преобразование конструкционного демпфирования в эквивалентное вязкое. В этом случае сила вязкого демпфирования будет прямо пропорциональна частоте. В отличие от первого подхода модальный метод позволяет задавать G в виде зависимости от частоты, т.е. использовать разное демпфирование на разных частотах.

В процессе натурального эксперимента одновременно с фиксированием акустических параметров производилась запись величин виброускорений в отдельных точках кронштейнов аппаратуры, установленной внутри отсека. Перечень фиксируемых вибрационных параметров с указанием места расположения датчиков приведен в табл. 2.

По каждому параметру фиксация значений производилась с частотой 8000 измерений в секунду. Данные по вибрационным параметрам представлены в виде зависимостей виброускорения от времени, а также в виде спектральных зависимостей.

В силу значительной размерности модели отсека и чрезвычайно большого количества шагов по времени, вывод результатов МКЭ-расчетов был ограничен отдельно взятыми узлами, соответствующими местам установки датчиков на модели натурального эксперимента. В табл. 3 представлена привязка датчиков измерения виброускорений к узлу конечно-элементной модели с указанием положения в цилиндрической системе координат. Ось Z данной системы координат направлена вдоль оси отсека к баку горючего, отсчет угла θ производился от плоскости I в направлении к плоскости II . Начало координат ле-

Таблица 2

Перечень вибрационных параметров

Индекс параметра	Место установки
ВИ6X ВИ6Y ВИ6Z	Кронштейн около узла крепления 1-го прибора ТТС (КЕАФ 45-020А)
ВИ7X ВИ7Y ВИ7Z	Кронштейн около узла крепления прибора ДУС (КЕАФ 34-008А), максимально удаленного от каркаса отсека
ВИ8X ВИ8Y	Кронштейн около узла крепления прибора УСВ (С-13165)
ВИ9X ВИ9Y	Кронштейн около узла крепления прибора С-13137 в районе пл.П
ВИ10X ВИ10Y ВИ10Z	Кронштейн около узла крепления прибора ДУС (КЕАФ 34-008А), ближнего к каркасу М60
ВИ11X ВИ11Y	Кронштейн около узла крепления прибора С-13117
ВИ12X ВИ12Y	Кронштейн около узла крепления прибора СКУ (С-13134)
ВИ14X ВИ14Y ВИ14Z	Кронштейн около узла крепления 2-го прибора ТТС (КЕАФ 45-020А)
ВИ18X ВИ18Y	Кронштейн около узла крепления БЦВМ (С-13111-01)
ВИ19X ВИ19Y	Кронштейн около узла крепления прибора коммутации НАП (ПК)

жит в плоскости нижнего шпангоута-юбки отсека.

Решение данной задачи методом конечных элементов с помощью пакета MSC.Patran/Nastran на компьютере высокой производительности (серверного класса) с 4-ядерным процессором Intel XEON 3,0 ГГц потребовало 300 Гб дискового пространства для записи файлов результатов расчетов. При этом время счета в случае использования метода разложения решения по формам собственных колебаний (при удержании собственных частот в диапазоне 0..1000 Гц) составляет 10 часов.

Для демонстрации влияния демпфирования на получаемое МКЭ-решение рассматривались три варианта задания G (см. табл. 4). В первом случае (расчет №1 рис.б) коэффициент демпфирования прямо пропорционален частоте. При этом решение методом разложения по формам собственных колебаний (Modal Transient) соответствовало решению, полученному прямым методом (Direct Transient) при $G = 0,52$ и $\omega_3 = 5024$ рад/с (800 Гц) в расчетах №2...3 рис. б с нелинейной зависимостью G от частоты.

Тестирование разработанной модели осуществля-

Таблица 3

Привязка вибродатчиков к конечно-элементной модели

Индекс параметра	Номер узла на модели отсека	Координаты узла в цилиндрической системе координат		
		R , м	θ , град	Z , м
ВИ6	75177	1,270096	6,822118	1,291000
ВИ7	79918	1,010795	26,561489	1,247000
ВИ8	53629	1,191522	176,436966	1,656000
ВИ9	52566	1,217919	90,189491	0,985000
ВИ10	75443	1,227921	20,836624	1,247000
ВИ11	58403	1,275449	-67,526230	1,071000
ВИ12	51150	1,084879	138,939743	1,326000
ВИ14	76789	1,269575	6,687136	0,985000
ВИ18	55127	1,111144	-142,155121	1,326000
ВИ19	56261	1,270870	-114,116882	1,453000

лось путем сопоставления результатов натурального эксперимента и численных расчетов методом конечных элементов. При этом были построены графики СПМ виброускорений, один из которых представлен на рис. 6

Как показывают результаты расчетов, МКЭ-решение достаточно сильно зависит от демпфирования. При этом данные натуральных испытаний располагаются между кривыми, построенными с использованием разра-

оченить уровень воздействия акустического давления, но и использовать указанную методику для борьбы с вибрацией путём отстройки от режима резонанса за счёт рационального выбора массы или жесткости колеблющейся системы, т.е. отстройки собственных частот агрегата и его отдельных узлов и деталей от частоты вынуждающей силы. Резонансные режимы устраняют двумя путями: либо изменением характеристик системы (массы конструкции

Таблица 4

Зависимость конструкционного демпфирования от частоты

ω , Гц	0	100	200	400	1000
Расчет №1	0	0,065	0,13	0,26	0,65
Расчет №2	0,16	0,28	0,13	0,01	0,07
Расчет №3	0,16	0,52	0,13	0,01	0,03

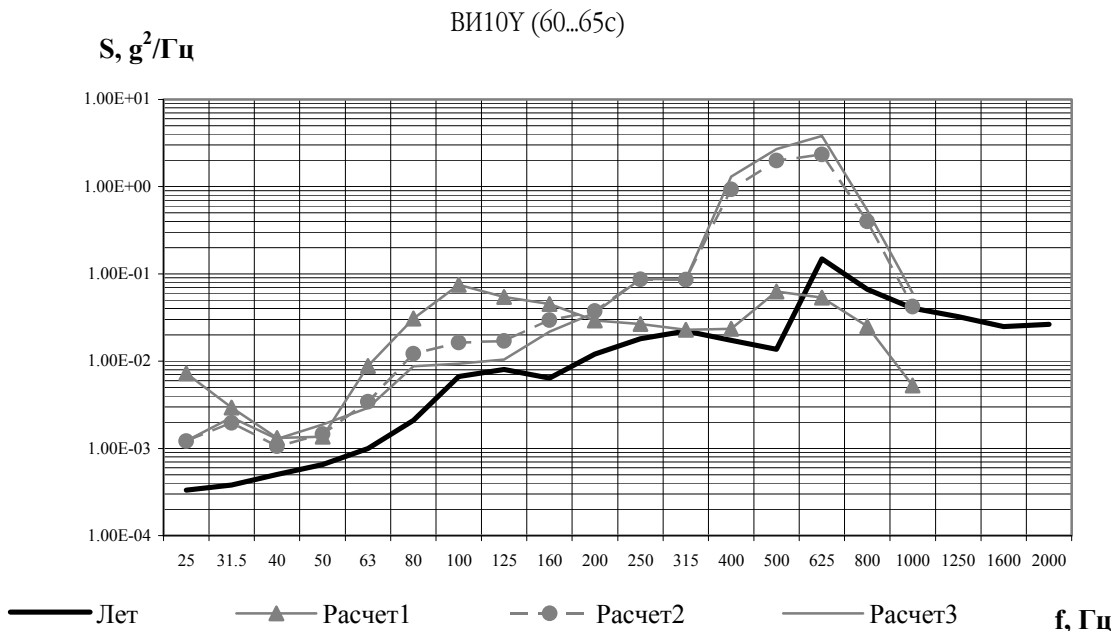


Рис. 6 Спектр виброускорений. Параметр ВИ10У

ботанной конечно-элементной модели, практически для всего интересующего диапазона частот (0...1000 Гц). Тем не менее следует отметить неплохую сходимость результатов МКЭ-расчетов и натуральных испытаний.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что с помощью МКЭ-расчетов можно не только

отсека в месте установки прибора, что в нашем случае соответствует установлению присоединённой массы в виде малого спутника, или частоты), либо установлением нового рабочего режима (отстройка от резонансного значения угловой частоты вынуждающей силы).

Литература

1. Рычков С.П. MSC.visualNASTRAN для Windows [Текст] / С.П. Рычков. – М.: ИТ Пресс, 2004 – 552 с.
 2. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows [Текст] / Д.Г. Шимкович. – М.: ДМК Пресс, 2001 – 448 с.

Материал поступил в редакцию 03. 03. 2009г.