

УДК 629.78.015.4:534.1

Е. Г. Долгих, Ю. Г. Архипкин, Е. А. Лысенко, К. Е. Лысенко

## СПОСОБ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ МЕТОДОМ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕРИФИЦИРОВАННЫХ КЭМ-МОДЕЛЕЙ

*Рассмотрен вопрос о недостаточности наземных статических испытаний на прочность корпусов негерметичных космических аппаратов (КА). Проведен анализ дополнительных испытаний конструкции КА на прочность методом кинематического возбуждения.*

*Ключевые слова: статические испытания, кинематическое возбуждение, верификация модели.*

Испытания конструкции КА на прочность проводятся статическими и динамическими методами. Специально для этих целей изготавливаются инженерные натурные макеты КА.

К задачам испытаний на прочность относятся: подтверждение статической прочности конструкции; проверка правильности заложенных конструктивных решений; проверка работоспособности после приложения нагрузок; экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния; выявление возможных конструктивных и технологических дефектов; оценка несущей способности (определение испытательных запасов прочности); определение жесткостных характеристик конструкции.

В результате анализа эксплуатационных нагрузок, действующих на КА, определяются расчетные случаи нагружений, рассчитываются значения напряжений по конструкции, разрабатываются программы и методики проведения испытаний, выбираются схемы, режимы и критерии положительных оценок испытаний конструкции.

При статических испытаниях на прочность космических аппаратов методом сосредоточенных сил инерционные нагрузки, действующие на объект испытания, воспроизводятся с помощью гидравлических силовозбудителей, специальным образом закрепленных в различных точках конструкции. При разработке испытательной схемы распределенные массы конструкции и грузов заменяются сосредоточенными массами таким образом, чтобы масса, собственные моменты инерции и положение центра масс модели были идентичны соответствующим характеристикам исходной конструкции.

Таким образом, при статических испытаниях инерционные нагрузки, действующие на КА при рассмотренных случаях нагружений, заменяются системой сосредоточенных статических сил (рис. 1).

К недостаткам статических испытаний на прочность корпусов КА негерметичного исполнения в лабораторных условиях относится следующее: практическая невозможность приложения нагрузок ко всем элементам конструкции из-за ограниченных возможностей испытательного оборудования (число рабочих каналов) и особенностей конструкции КА (невозможно, например, приложить силу к элементам внутри замкнутого корпуса). Так же при проведении испытаний в местах приложения результирующих сил, имитирующих распределенную инерци-

онную нагрузку, возникают локальные зоны напряжений, превышающие расчетные.

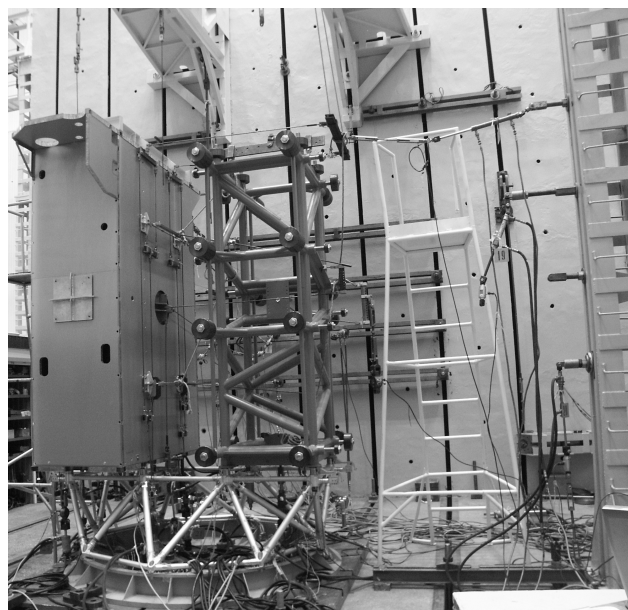


Рис. 1. Статические испытания конструкции КА «Глонасс-К» системой сосредоточенных сил

Особенностью конструкции КА негерметичного исполнения являются сотопанели с большим количеством вклеенных в них закладных элементов.

Закладные элементы конструкции воспринимают инерционные нагрузки и передают их на первичные элементы конструкции (панели, стойки). Поэтому, на этапе наземной экспериментальной отработки необходимо проверять тысячи закладных. Большинство приборов устанавливается на закладных внутри корпуса КА. В собранном состоянии аппарата задача статических испытаний закладных элементов методом прикладывания силы на практике нереализуема.

Прочность всей конструкции КА негерметичного исполнения можно испытать методом кинематического возбуждения. При этом можно уйти от недостатков, присущих испытаниям статическими методами.

Суть предлагаемого метода заключается в том что поэтапно к основанию конструкции объекта испытания прикладывается в определенном направлении кинематическое синусоидальное воздействие постоянной частоты

ты таким образом, чтобы уровень напряжений в стержнях устройства отделения соответствовал напряжениям, возникающим при расчетных случаях. Частота колебаний для испытаний выбирается из дорезонансной области амплитудно-частотной характеристики объекта для того, чтобы не достичь первой формы колебаний и не получить существенного усиления по высоте конструкции. Таким образом, контролируя внутренние напряжения, задаваемые кинематическим методом в стержнях устройства отделения, можно приложить ко всем элементам конструкции аппарата распределенные инерционные силы в соответствии с их массами. Объект испытаний размещается на вибростенде (рис. 2).

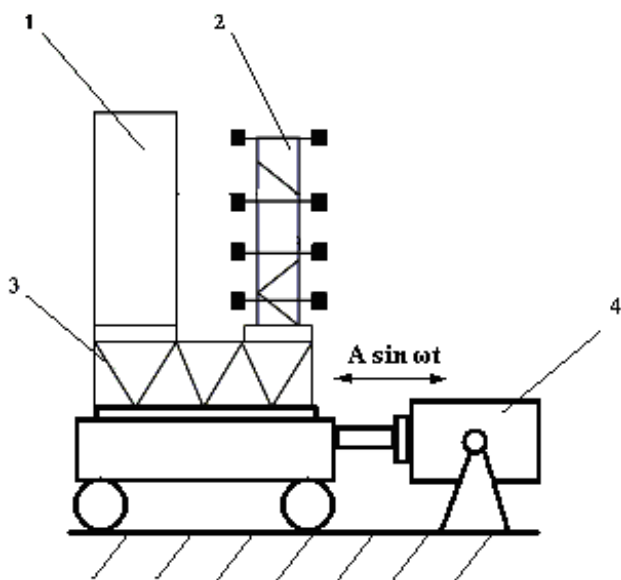


Рис. 2. Схема испытаний конструкции КА негерметичного исполнения методом кинематического возбуждения:  
1 – корпус КА; 2 – инерционно-весовой макет корпуса КА;  
3 – устройство отделения для системы из двух КА;  
4 – электродинамический возбудитель колебаний.

Возможность проведения испытаний анализировалась на примере натурного макета 06СТИ корпуса негерметичного космического аппарата «Глонасс-К» на расчетный случай «Старт» (рис. 1).

В соответствии с натурным макетом средствами NASNRRAN разработана конечно-элементная модель устройства отделения с размещенными на нем корпусом КА и инерционно-весовым макетом корпуса.

Рассчитаны значения эквивалентных напряжений в стержнях фермы УО от внешних нагрузок расчетного случая «Старт». Для примера, на рис. 3 показана диаграмма эквивалентных напряжений в стержнях УО на расчетный случай «Старт Z».

Для определения собственных частот конструкции численными методами проведен модальный анализ, в результате которого выявлены первые 10 собственных форм колебаний и соответствующих им частот, определены эффективные массы (рис. 4, частота 11,83 Гц).

С целью определения первой собственной частоты и верификации разработанной модели проведены испытания натурного макета методом качающейся частоты. Схема динамического испытания (рис. 5) разработана в со-

ответствии с полученными данными при модальном анализе. Направление вынужденных колебаний, задаваемых при испытаниях кинематическим возбуждением, ось Z объекта испытания.

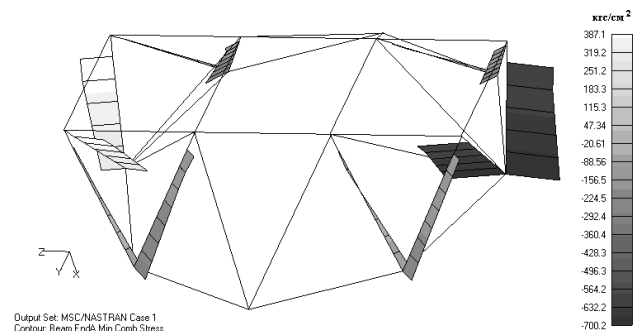


Рис. 3. Диаграмма напряженного состояния наклонных стержней устройства отделения. Расчетный случай «Старт Z»

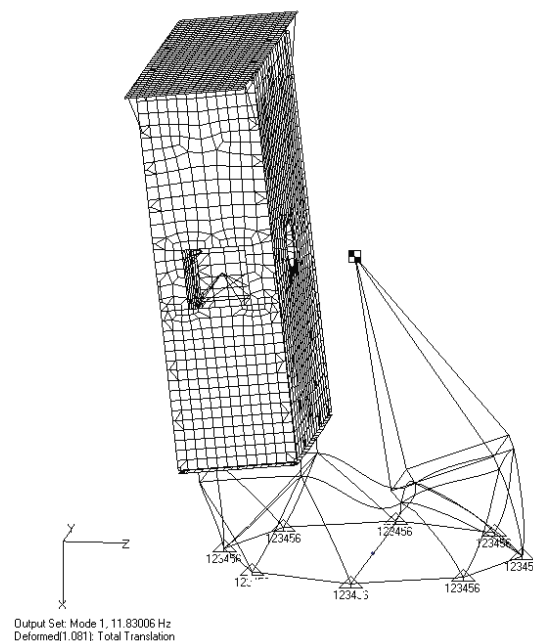


Рис. 4. Модальный анализ. Первая собственная форма колебаний. Направление – ось Z изделия

Графики отклика на вынужденное воздействие зафиксированные акселерометрами, представлены на рис. 6. Резонансные явления наблюдались в области 11–11,8 Гц, что соответствует полученной при модальном анализе конечно-элементной модели первой форме колебаний.

По результатам проведенных испытаний произведена верификация конечно-элементной модели и подобрана из дорезонансной области частота 7 Гц для испытаний натурного макета методом кинематического возбуждения.

Для испытаний кинематическим возбуждением методом последовательных приближений рассчитаны уровни перегрузки по различным направлениям приложения возбуждения, так, чтобы напряжения в стержнях устройства отделения соответствовали напряжениям, полученным при расчете от внешних нагрузок случая «Старт».

Одна из полученных таким образом диаграмм напряженного состояния в стержнях УО при приложении кинематической перегрузки 2,39g в направлении оси Z представлена на рис. 7 для сравнения с диаграммой, изображенной на рис. 3.

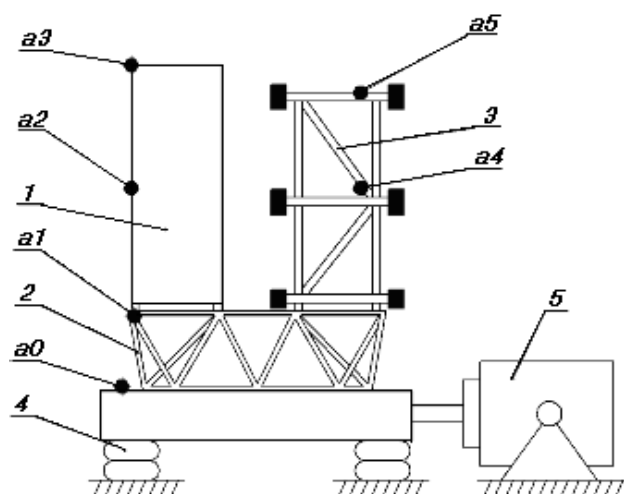


Рис. 5. Схема проведения испытаний для выявления первой собственной частоты и верификации расчетной модели: 1 – корпус КА; 2 – ферма УО; 3 – инерционно-весовой макет изделия; 4 – пневмоопора; 5 – ЭДВ: *a0* – акселерометр контроля задаваемых режимов; *a1*, *a2*, *a3* – измерительные акселерометры на корпусе КА; *a4*, *a5* – измерительные акселерометры на ИВМ изделия

Критерием положительной оценки результатов испытаний является отсутствие механических повреждений всех элементов конструкции после нагружения и проведение испытаний в соответствии с режимами.

В результате проведенного анализа была подтверждена возможность проведения испытаний на прочность конструкции аппарата негерметичного исполнения методом кинематического возбуждения, которая может в дальнейшем применяться при создании новых космических аппаратов негерметичного исполнения.

Описанный способ кинематических испытаний космического аппарата нуждается в дальнейшей более детальной проработке.

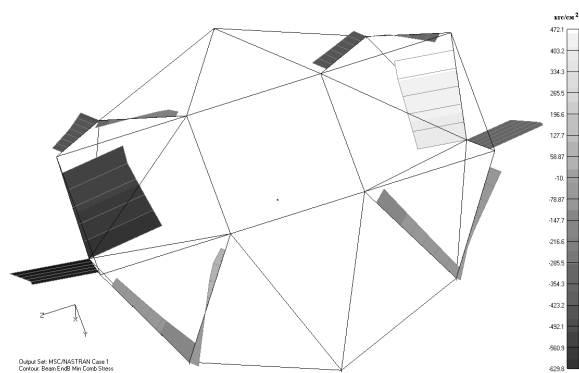


Рис. 7. Диаграмма напряженного состояния наклонных стержней фермы УО. Перегрузка 2,39g в направлении оси Z

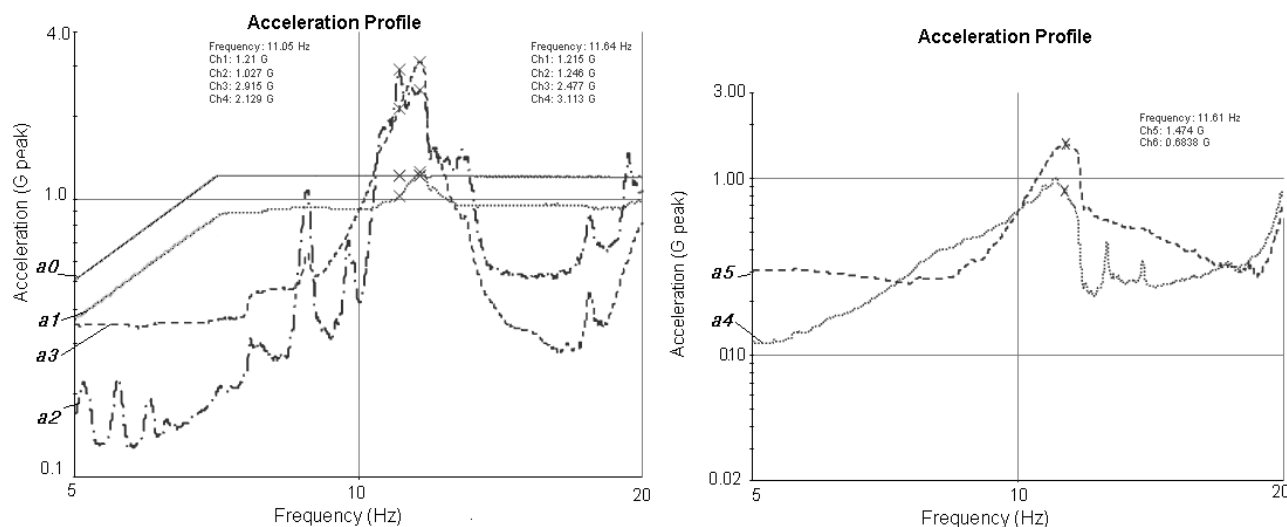


Рис. 6. Графики отклика на вынужденное воздействие

E. G. Dolgikh, Y. G. Arhipkin, E. A. Lysenko, K. E. Lysenko

## SPACECRAFT STRUCTURAL TEST METHOD BASED ON KINEMATIC EXCITATION TECHNIQUE USING VERIFIED FINITE ELEMENT MODELS

*The problem of spacecraft structure ground static strength tests insufficiency is discussed in the paper. The additional spacecraft structure strength tests by means of kinematic excitation method has been carried out.*

*Keywords: static strength tests, kinematical excitation, verification finite element model.*