

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «АИСТ-2Д»

© 2016 Д. Н. Гребнев, В. К. Дуплихин, Я. А. Зуперман,
А. И. Аистов, В. Е. Кукушкин

Акционерное общество «РКЦ «Прогресс», г. Самара

В статье изложены принципы применения технологии имитационного моделирования при проведении статических испытаний изделий ракетно-космической техники на примере малого космического аппарата (МКА) «АИСТ-2Д». Приведены ограничения статических испытаний, не позволяющие в полной мере исследовать напряжённо-деформированное состояние изделия. В качестве дополнительного метода анализа напряжённо-деформированного состояния изделия предложено проведение имитационных статических испытаний с помощью метода конечных элементов с использованием пакета конечно-элементного анализа MSC.Patran/Nastran. Сформулированы цели и задачи имитационных испытаний, а также приведено описание основных этапов имитационного моделирования испытаний. Для получения достоверных результатов имитационных испытаний требуется проведение валидации конечно-элементной модели изделия, которая заключается в подтверждении правильности модели путём исследования напряжённо-деформированного состояния конструкции лётного изделия. Эффективность метода подтверждена при проведении имитационных испытаний МКА «АИСТ-2Д», проведённых параллельно со статическими испытаниями изделия. Сходимость результатов испытаний составила в среднем 8 %. Применение метода имитационного моделирования статических испытаний обеспечивает сокращение затрат на проведение статических испытаний, улучшает качество обработки статической прочности и повышает надёжность изделия.

Малый космический аппарат, имитационное моделирование, метод конечных элементов, статические испытания, напряжённо-деформированное состояние, валидация имитационной модели.

Для подтверждения прочностных и жёсткостных характеристик готового изделия проводятся статические испытания, подготовка которых требует изготовления дорогостоящего опытного образца изделия и оснастки, а также разработки большего объёма технической документации.

Статические испытания считаются наиболее достоверным способом подтверждения прочности конструкции. Однако данный способ имеет свои ограничения:

– опытный образец изделия для проведения статических испытаний может иметь отличные от лётного изделия размеры в пределах допусков по конструкторской документации;

– при изготовлении опытного образца возможны отступления от конструкторской документации, которые могут повлиять на напряжённо-деформированное состояние конструкции изделия;

– в условиях испытательного комплекса не всегда есть возможность приложить эксплуатационные нагрузки, например, инерционные;

– отсутствует возможность измерения напряжённо-деформированного состояния в труднодоступных местах конструкции;

– в процессе проведения статических испытаний нагружение осуществляется через оснастку, деформации которой не всегда возможно исключить.

Цитирование: Гребнев Д.Н., Дуплихин В.К., Зуперман Я.А., Аистов А.И., Кукушкин В.Е. Применение имитационного моделирования при проведении статических испытаний малого космического аппарата «АИСТ-2Д» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 43-49. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-43-49

Эти ограничения могут сказаться на достоверности результатов статических испытаний.

Применение конечно-элементных моделей [1-3] в анализе прочности и жёсткости конструкций ракетно-космической техники, а также возрастающие возможности ЭВМ позволяют переходить к имитационному моделированию как к методу эффективного исследования и обеспечения прочности конструкции.

Имитационное моделирование испытаний – это подробное моделирование физических испытаний на конечно-элементной модели средствами программных пакетов для конечно-элементного анализа.

Отметим следующие преимущества статических испытаний методом имитационного моделирования:

- удешевление статических испытаний за счёт уменьшения числа случаев нагружения, уменьшения количества оснастки, сокращения сроков испытаний;
- возможность проведения статических испытаний на лётном изделии без изготовления опытного изделия;
- подтверждение прочности аналогичных конструкций по отработанной конечно-элементной модели.

Целями имитационных испытаний являются:

- оптимизация объёма зачётно-статических испытаний (ЗСТИ);
- подтверждение прочности модернизированных изделий без повторного проведения зачётных статических испытаний.

Для проведения имитационных испытаний требуется:

- разработать максимально подробную конечно-элементную модель (КЭМ) для каждого сочетания нагрузок;
- большая мощность вычислительной техники.

Следует отметить, что статические испытания методом имитационного моделирования не исключают статические ис-

пытания, но позволяют обойти вышеперечисленные ограничения.

Проведение имитационного моделирования состоит из следующих этапов:

- разработка конечно-элементной модели изделия;
- предварительные статические испытания методом имитационного моделирования с целью выявления критических зон конструкции;
- верификация конечно-элементной модели и объекта испытаний;
- валидация конечно-элементной модели испытываемого изделия;
- подтверждение прочности изделия с помощью уточнённой конечно-элементной модели.

С целью подтверждения эффективности метода имитационного моделирования параллельно со статическими испытаниями малого космического аппарата «АИСТ-2Д» (рис. 1), проводимыми на базе АО «РКЦ «Прогресс», были проведены и имитационные испытания.

Для проведения имитационных испытаний была разработана конечно-элементная модель малого космического аппарата «АИСТ-2Д» (рис. 2).

Силовые элементы аппарата (рама, устройство отделения) моделировались с помощью четырёхузловых оболочечных элементов CQUAD. Сотовые панели [4] моделировались как трёхслойная конструкция, в которой обшивки и тепловые трубы выполнены элементами CQUAD, а сотозаполнитель – объёмными восьмиузловыми элементами CHEXA.

Крупногабаритные приборы и приборы, центр масс которых значительно отстоит от плоскости панели, моделировались с помощью абсолютно жёстких связей RBE2, которым в качестве зависимых узлов заданы узлы балочных элементов втулок, соответствующие штатным местам крепления приборов. В качестве независимого узла RBE2 задан узел, координаты которого соответствуют положению центра масс приборов.

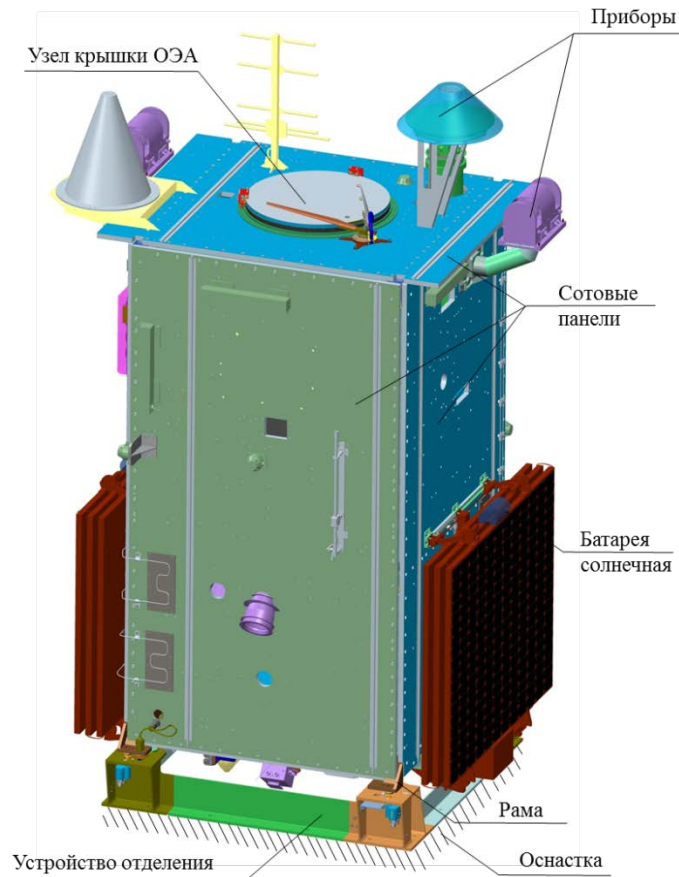


Рис. 1. Общий вид МКА «АИСТ-2Д»



Рис. 2. КЭМ МКА «АИСТ-2Д»

Остальные приборы не моделировались, и их масса была включена в общую массу конечно-элементной модели МКА «АИСТ-2Д». При проведении статических испытаний было замечено, что сходимость результатов повышается при моделировании оснастки абсолютно жёсткими связями RBE2 по сравнению интерполяционными связями RBE3.

На этапе подготовки статических испытаний были проведены предварительные статические испытания методом имитационного моделирования. Эти испытания представляют собой расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции испытываемого изделия при воздействии испытательных нагрузок. Расчёт проводился с отражением граничных условий и оснастки, влияющей на жесткость конструкции.

По результатам такого расчёта была проведена верификация конечно-

элементной модели аппарата и объекта испытаний. Задачей верификации является проверка правильности разработанной модели и собранной схемы нагружения изделия на статических испытаниях путём сравнения результатов после предварительного нагружения.

Далее была проведена валидация КЭМ, т.е. процесс устранения несоответствия в поведении КЭМ и реальной конструкции под действием одних и тех же нагрузок.

Для проведения процесса валидации к реальной конструкции необходимо приложить «тестовые» нагрузки:

- часть эксплуатационных нагрузок (совокупных);

- нагрузки, позволяющие выявить особенности напряжённо-деформированного состояния конструкции [5], например, нагрузки только по одной из осей изделия.

При нагружении лётного изделия «тестовые» нагрузки должны быть подобраны таким образом, чтобы в конструкции не оставалось остаточных деформаций.

Отработанная на статических испытаниях расчётная модель может быть использована для уточненного анализа напряжённо-деформированного состояния.

В процессе валидации конечно-элементной модели МКА «АИСТ-2Д» были учтены деформации оснастки и уточнены граничные условия в узлах крепления рамы к устройству отделения.

На рис. 3, 4 показано нагружение изделия испытательными нагрузками на статических и имитационных испытаниях соответственно.

Для отработки расчётной модели требуется наличие достоверных исходных данных о свойствах конструкции – механических свойствах материалов и размерах конструктивных элементов. Это особенно важно для наиболее нагруженных мест конструкции при наличии больших разбросов свойств. Например, для механических свойств деталей из композиционных материалов или для размеров литых деталей с необработанными поверхностями.

Для получения реальных данных о размерах и свойствах конструкции необходимо включать в конструкторскую документацию на объект испытаний требования по измерению и документированию размеров и механических свойств в критических зонах конструкции.

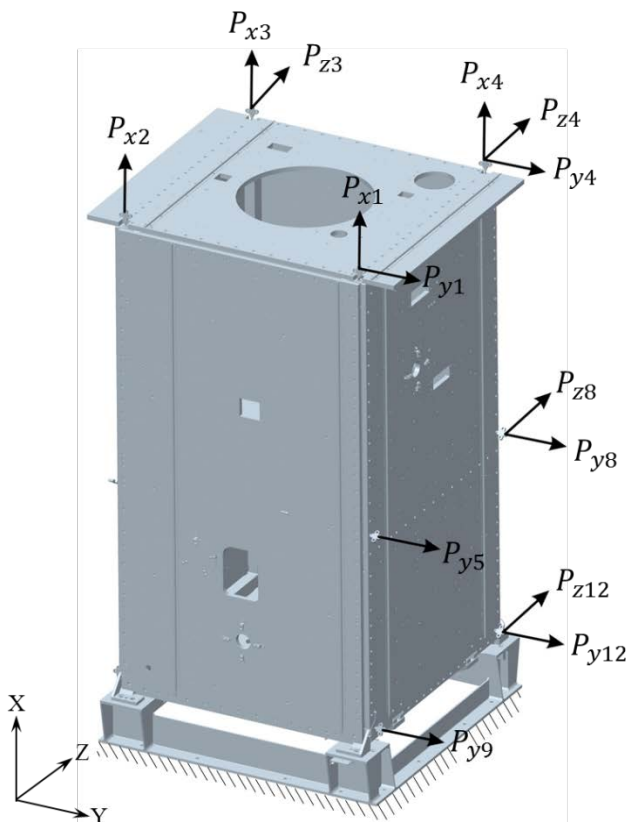


Рис. 3. Нагружение МКА «АИСТ-2Д» на статических испытаниях

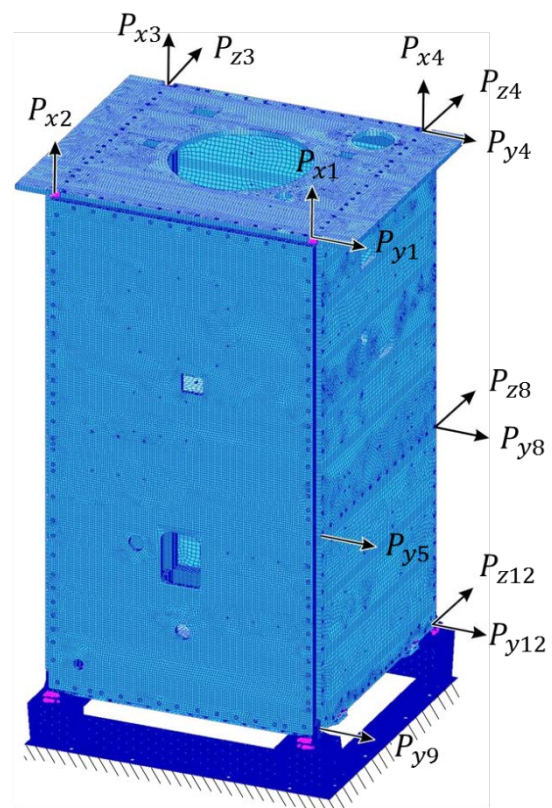


Рис. 4. Нагружение КЭМ МКА «АИСТ-2Д» на имитационных испытаниях

Датчики на статических испытаниях были расставлены согласно рис. 5. Измерение напряжений и перемещений на имитационных испытаниях проводилось в узлах КЭМ, соответствующих местам установки датчиков на статических испытаниях.

Сравнение результатов имитационных испытаний с результатами статиче-

ских испытаний показало сходимость по значениям напряжений и перемещений в среднем 8 % (табл. 1).

Таким образом, применение метода имитационного моделирования испытаний позволяет улучшить анализ статической прочности и повысить надёжность изделия в целом.

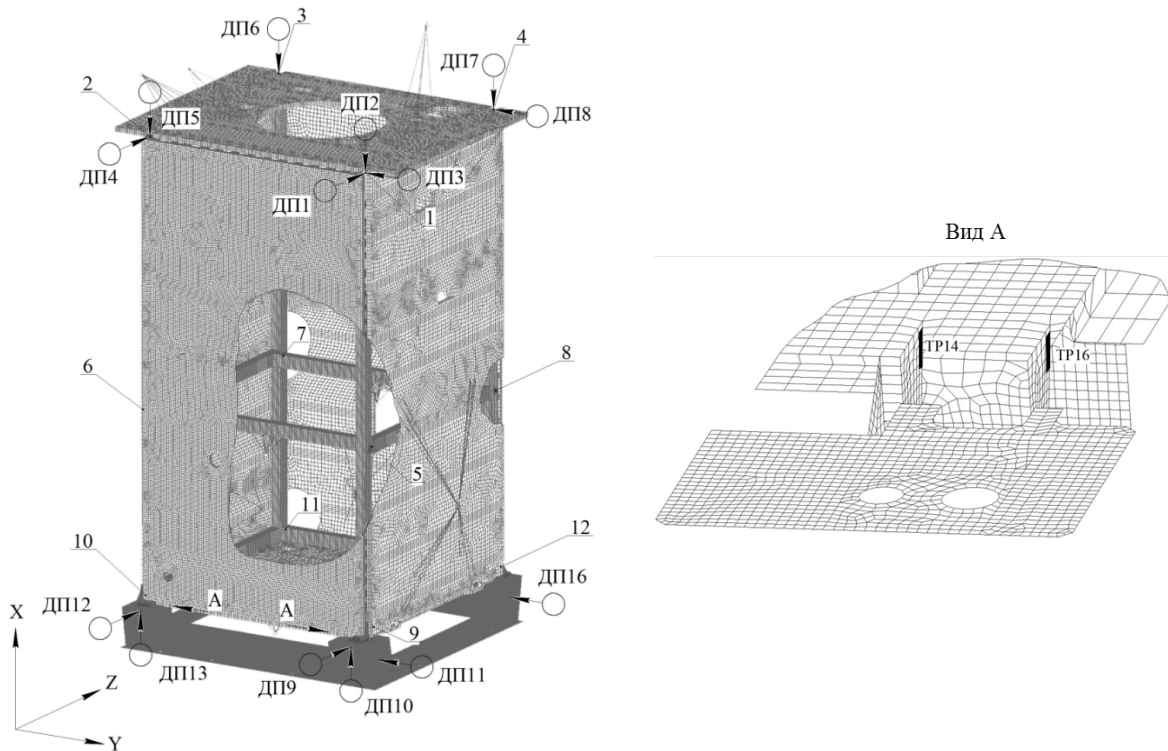


Рис. 5. Схема расстановки датчиков на статических испытаниях МКА «АИСТ-2Д»

Таблица 1. Сравнение результатов испытаний

Величина измерений	Номер зоны	Номер узла	Результаты		Сходимость результатов, %
			КЭМ	ЗСТИ	
Перемещения, мм	1	ДП1	1,95	2,16	9,7
		ДП3	6,23	6,24	0,2
	2	ДП4	2,02	2,36	14,4
		ДП5	2,74	2,56	9,7
	3	ДП6	1,88	1,59	18,2
	4	ДП8	6,16	5,93	3,9
	10	ДП13	1,71	1,73	1,2
11	ДП14	0,96	0,89	7,9	
Напряжения, МПа	11	ТР14	-113	-114	0,9
		ТР16	-139	-159	12,6

Библиографический список

1. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977. 351 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.
3. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: уч. пособие. М.: Наука, 1986. 560 с.
4. Леонов В.И. Расчёт элементов авиационных конструкций типа ортотропных и трёхслойных пластин: уч. пособие. Куйбышев: КуАИ, 1983. 61 с.
5. Биргер И.А., Пановко И.Г. Прочность. Устойчивость. Колебания. Т. 1. М.: Машиностроение, 1968. 831 с.

Информация об авторах

Гребнев Дмитрий Николаевич, заместитель главного конструктора, заместитель начальника отделения, АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: grebnev@samspace.ru. Область научных интересов: оптимизация методов наземной отработки ракетно-космической техники.

Дуплихин Владимир Константинович, начальник отдела, АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: duplihin@samspace.ru. Область научных интересов: имитационное моделирование.

Зуперман Яков Абрамович, начальник сектора, АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: zuperman@samspace.ru. Область научных интересов: методы отработки прочности ракетно-космической техники.

Аистов Алексей Иванович, начальник сектора, АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: aistov@samspace.ru. Область научных интересов: математическое моделирование ракетно-космической техники.

Кукушкин Валерий Евгеньевич, инженер-конструктор 1 категории, АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: kukushkin@samspace.ru. Область научных интересов: имитационное моделирование статических испытаний.

APPLICATION OF SIMULATION MODELLING IN STATIC TESTS OF SPACE-ROCKET VEHICLES

© 2016 D. N. Grebnev, V. K. Duplihin, J. A. Zuperman, A. I. Aistov, V. E. Kukushkin

JSC Space Rocket Centre «Progress», Samara, Russian Federation

The study presents the principles of application of simulation modeling in conducting static tests of aerospace products using the small satellite (SS) «Aist-2D» as an example. Limitations of static tests that do not allow comprehensive analysis of the stress-strain state of a satellite are discussed. For example, it is not always possible to install sensors for measuring stress in remote locations. Simulation static tests using the finite element method with the use of the finite-element analysis MSC. Patran/Nastran package is proposed as an additional method of analyzing the stress-strain state of a product. The goals and tasks of the simulation tests are formulated and the main stages of the simulation modeling tests are described. To obtain consistent results of simulation modeling tests validation of the finite-element model of a satellite is required. The validation consists in confirming the adequacy of the model by analyzing the stress-strain state of the structure of the satellite. The main advantage of the simulation modeling test is the reduction of the cost of preparing and conducting the static tests. The efficiency of the method was confirmed in conducting the simulation modeling tests of the SS «Aist-2D», held in parallel with the static tests of the satellite. Thus, the application of the method of simulation

Citation: Grebnev D.N., Duplihin V.K., Zuperman J.A., Aistov A.I., Kukushkin V.E. Application of simulation modelling in static tests of space-rocket vehicles. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 43-49. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-43-49

modeling of static tests makes it possible to reduce the costs of static tests, improve the quality of static strength experiments and, consequently, increase the reliability of the satellite.

Small satellite, simulation modelling, static tests, finite element method, stress-strain state, validation of the simulation model.

References

1. Strang G., Fix G.J. An Analysis of the Finite Element Method. Prentice Hall, New Jersey, 1973. 306 p.
2. Zenkevich O.C. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite-element method in engineering]. Moscow: Mir Publ., 1975. 542 p.
3. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Soprotivlenie materialov: uch. posobie* [Strength of materials. Manual]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 560 p.
4. Leonov V.I. *Raschet elementov aviatsionnykh konstruktsiy tipa ortotropnykh i trekhsloynnykh plastin: uch. posobie* [Calculation of elements of aircraft structures of the type of orthotropic and three-layer plates. Manual]. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1983. 61 p.
5. Birger I.A., Panovko I.G. *Prochnost'. Ustoychivost'. Kolebaniya. T. 1* [Strength. Stability. Vibrations]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. 831 p.

About the authors

Grebnev Dmitriy Nikolaevich, Deputy Chief Designer, Deputy Head of Department, JSC Space Rocket Centre «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: grebnev@samspace.ru. Area of Research: optimisation of methods of ground tests of space-rocket vehicles.

Duplihin Vladimir Konstantinovich, Head of Department, Space Rocket Centre «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: duplihin@samspace.ru. Area of Research: simulation modelling.

Zuperman Jakov Abramovich, Head of Sector, JSC Space Rocket Centre «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: zuperman@samspace.ru. Area of Research: methods of testing strength of space-rocket vehicles.

Aistov Aleksey Ivanovich, Head of Sector, JSC Space Rocket Centre «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: aistov@samspace.ru. Area of research: mathematical modelling of space-rocket vehicles.

Kukushkin Valeriy Evgenyevich, Design Engineer of the 1st category, JSC Space Rocket Centre «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: kukushkin@samspace.ru. Area of Research: simulation modelling of static tests.