

УДК 539.3: 621.81

А.М. Тонконоженко, В.В. Сатокин, П.Г. Дегтяренко

## ВИРТУАЛЬНЫЕ ТЕПЛОСТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ СТАРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОСМОДРОМА АЛКАНТАРА

*Представлена компьютерная технология проведения виртуальных теплостатических испытаний конструктивных систем крепления защитных корпусов устройств заправки космической ракеты-носителя "Циклон-4" при моделировании монтажных, газодинамических и температурных воздействий, возникающих в процессе подготовки и проведения пусков РН на космодроме Алкантара.*

*Подано комп'ютерну технологю проведення віртуальних теплостатичних випробувань конструктивних систем кріплення захисних корпусів пристроїв заправлення космічної ракети-носія "Циклон-4" під час моделювання монтажних, газодинамічних і температурних впливів, що виникають у процесі підготовки та проведення пусків РН на космодромі Алкантара.*

*The computer technology is given for virtual thermostatic tests of the attachment system for Cyclone-4 space launch vehicle filling device protective housing at simulation of assembly, gas-dynamic, and temperature effects during LV prelaunch processing and launch at Alcantara Launch Base.*

### Введение

Изготовление натурных конструкций и опытных изделий для экспериментальной отработки и проведение испытаний на этом этапе являются одной из наиболее затратных статей при разработке РН и стартового оборудования. Одним из возможных и эффективных направлений снижения указанных затрат и сокращения сроков разработки изделий является создание специальных компьютерных технологий для моделирования эксплуатационного и запредельного состояний ответственных систем и проведения виртуальных разрушающих и эксплуатационных испытаний натурных конструкций.

### Постановка задачи

Рассмотрена задача компьютерного моделирования эксплуатационного механического состояния систем крепления защитных корпусов автоматических стыковочных устройств (АСУ) заправочно-дренажных коммуникаций РН к бетонному основанию и проведения на этой основе виртуальных теплостатических испытаний конструктивных систем крепления корпусов при эксплуатационных и нерасчетных воздействиях в условиях натурной эксплуатации при пусках РН.

### Численное моделирование

Защитные корпуса АСУ выполнены в виде коробчатых цельносварных стальных конструкций (рис. 1), которые смонтированы на закладных элементах и крепятся шпильным соединением к бетонному основанию стартового сооружения космодрома.

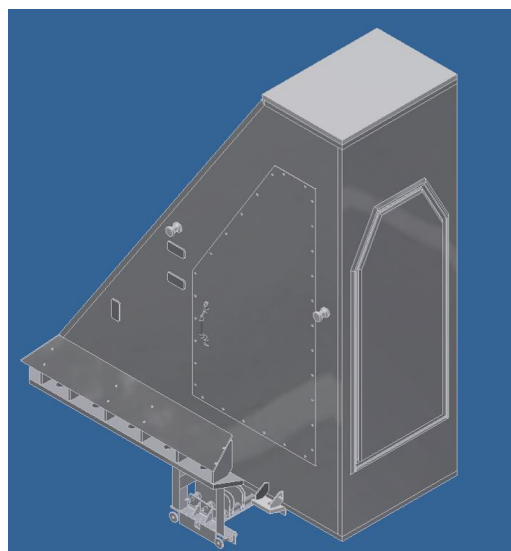


Рис. 1. Конструктивная схема корпуса

При старте РН защитные корпуса АСУ подвергаются прямому воздействию струи от двигательной установки первой ступени с неравномерным и переменным во времени распределением температурных и газодинамических параметров по всем поверхностям конструкции.

В качестве тестового рассмотрен гипотетический случай виртуального теплостатического нагружения системы крепления "корпус АСУ – основание" при снятии момента затяжки шпилек соединения в результате их нагрева в процессе старта РН (в соответствии с конструкторской документацией элементы шпилечного соединения защищены от нагрева теплозащитным покрытием).

Моделирование механического состояния корпусов АСУ при монтажных и эксплуатационных теплосиловых воздействиях было реализовано на основе разработанной компьютерной технологии, реализующей поэтапно: построение конечно-элементной 3D-модели конструкции, задание реальных физико-механических характеристик материала с учетом эксплуатационного нагрева, фактических газодинамических и температурных нагрузок по поверхности и толщине элементов конструкции, имитацию условий штатного закрепления корпуса и проведение расчета механического состояния для каждого момента времени нагрева корпуса.

Учитывая сложность задания при расчетах неравномерного распределения температурных полей и газодинамических нагрузок по всем элементам конструкции, возникла необходимость разработки специального метода построения регулярной сетки конечных элементов [1], что позволило сократить время подготовки и проведения расчетов с использованием программного комплекса ANSYS.

Базовые конечно-элементные модели, соответствующие заданным в документации геометрическим и механическим параметрам конструкции, в том числе в зонах сварных швов, создавались с использованием трехмерных элементов типа SOLID.

Расчет проводился в нелинейной постановке, при которой одновременно учитывались:

- зависимость физико-механических свойств материала корпуса и бетонного основания: модуля упругости, предела текучести, коэффициента линейного расширения – от температуры нагрева;

- контактное взаимодействие между люками и боковыми поверхностями, между поверхностями и крышкой;

- контактное взаимодействие между закладными элементами корпуса и бетонным основанием стартового сооружения.

Конечно-элементная модель корпуса с бетонным основанием и нагрузками представлена на рис. 2.

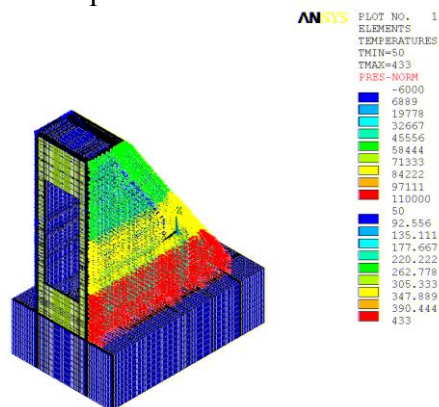


Рис. 2. Модель корпуса с нагрузками

Модель фрагмента закладных элементов без бетона представлена на рис. 3.

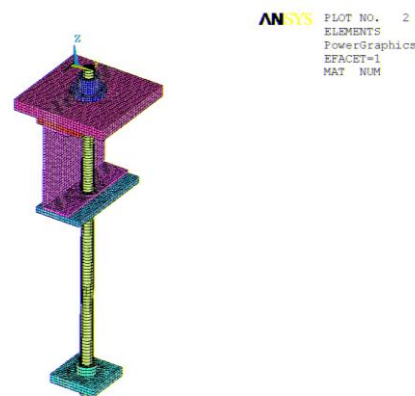


Рис. 3. Модель фрагмента закладных элементов

### Виртуальные испытания

Задачами проводимых виртуальных теплостатических испытаний были определены:

- 1) подтверждение прочности и работоспособности штатной системы крепления корпусов АСУ к бетонному основанию стартового сооружения при эксплуатационных и монтажных нагрузках в составе общей сборки "корпус АСУ – опорная рама – закладные элементы – бетонное основание";

2) проверка работоспособности элементов крепления корпуса при нештатной ситуации в случае снятия момента затяжки всех шпилек в результате нагрева в процессе старта РН.

На первом этапе практической реализации компьютерной программы виртуальных испытаний последовательно были проведены исследования механического состояния элементов системы крепления корпуса АСУ в составе штатной сборки для основных расчетных случаев с учетом монтажных усилий при установке корпусов, нестационарных температурных и газодинамических воздействий при старте РН.

Картина напряженно-деформированного состояния (НДС) системы в сборе, корпуса АСУ, опорной рамы с закладными элементами для крепления в бетонном основании представлена на рис. 4, 5, 6.

По результатам проведенных расчетов работоспособность штатной системы крепления корпуса АСУ к бетонному основанию обеспечивается при уровне максимальных напряжений в шпильках  $\sigma=41,3$  кгс/мм<sup>2</sup>, которые ниже допустимых  $\sigma=42,5$  кгс/мм<sup>2</sup> [2].

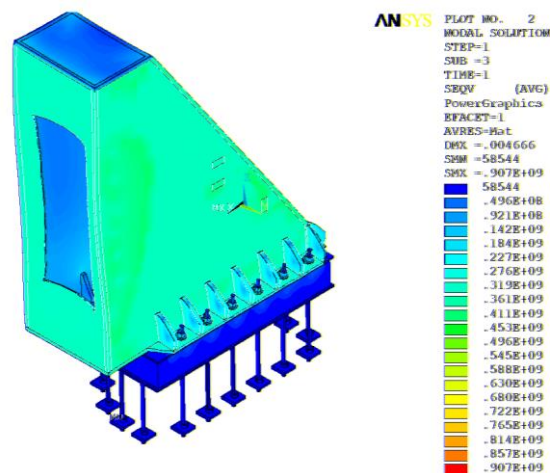


Рис. 4. Напряженное состояние системы в сборе

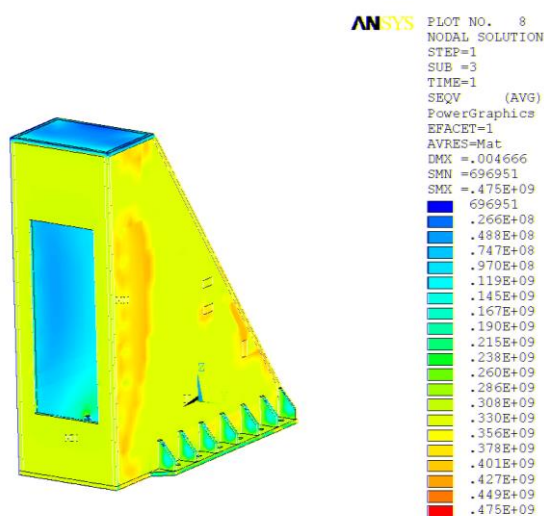


Рис. 5. Напряженное состояние корпуса АСУ

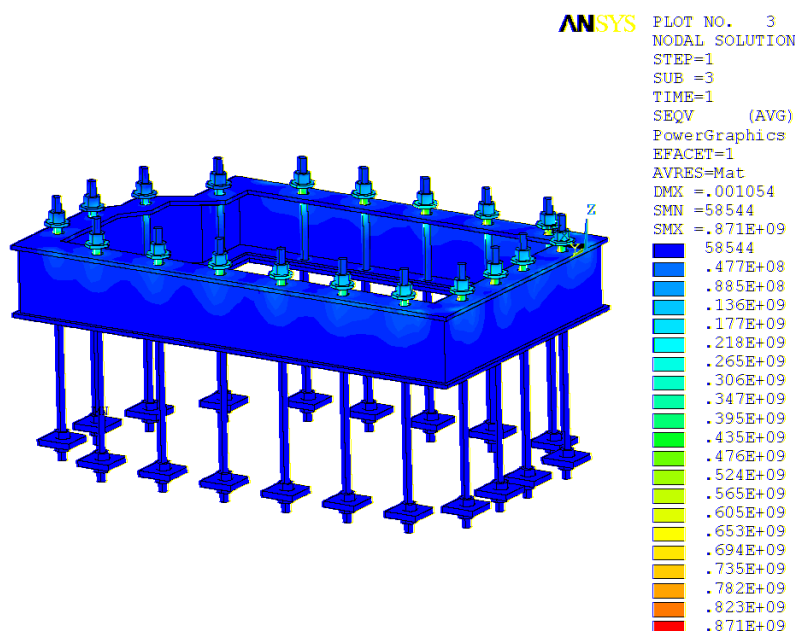


Рис. 6. Напряженное состояние рамы и закладных элементов крепления

На втором этапе виртуальных испытаний было исследовано механическое состояние системы крепления в нештатной ситуации при снятии из-за нагрева момента затяжки шпилек крепления корпуса АСУ к бетонному основанию и реализации эксплуатационных теплосиловых воздействий в процессе старта РН.

Картина НДС шпилек при снятии затяжки с применением масштабного коэффициента для отображения характера деформирования приведена на рис. 7.

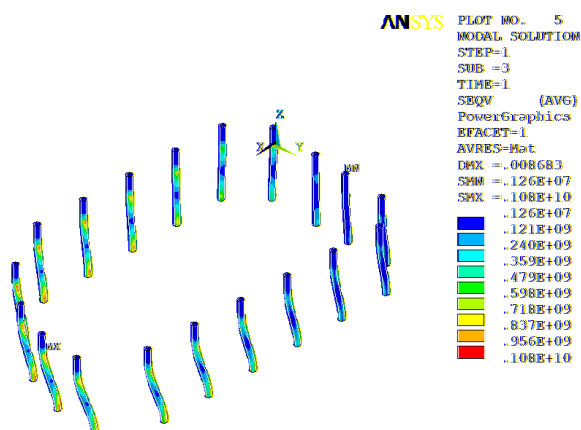


Рис. 7. Картина НДС шпилек

В этом случае для наиболее нагруженной шпильки уровень максимальных напряжений  $\sigma=110,2$  кгс/мм<sup>2</sup> выше предельного значения  $\sigma_b=110$  кгс/мм<sup>2</sup>, что может привести к ее разрушению и увеличению нагруженности остальных шпилек [2].

Картина механического состояния шпилек после разрушения максимально нагруженной шпильки показана на рис. 8.

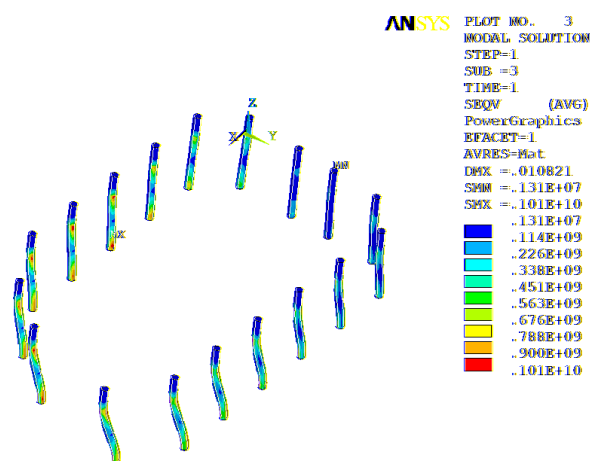


Рис. 8. Картина НДС шпилек после разрушения максимально нагруженной шпильки

Уровень максимальных напряжений в шпильках  $\sigma=103$  кгс/мм<sup>2</sup> выше предела текучести материала шпилек  $\sigma_t=85$  кгс/мм<sup>2</sup> и свидетельствует об их вероятном повреждении в рассмотренной нештатной ситуации при действии эксплуатационных теплосиловых нагрузок.

## Выводы

1. Виртуальные испытания подтверждают:

- работоспособность штатных систем крепления корпусов АСУ к бетонному основанию стартового сооружения при эксплуатационных температурных и газодинамических воздействиях в процессе пуска РН "Циклон-4" на космодроме Алкантара;

- возможность нештатной ситуации при снятии момента затяжки шпилек соединения в условиях действия эксплуатационных теплосиловых нагрузок при старте РН;

- необходимость контроля состояния теплозащитного покрытия шпилек и затяжки элементов крепления корпусов АСУ в процессе эксплуатации стартового оборудования.

2. Проведение виртуальных испытаний разрабатываемых изделий позволяет в ряде практических случаев дополнить системный анализ работоспособности ответственных ракетных конструкций при штатных и нерасчетных условиях эксплуатации без проведения натурных экспериментальных исследований.

## Список использованной литературы

1. Сатокин В.В. Разработка и апробация метода Микеланджело //САПР и Графика. – №7. – М.: ООО КомпьютерПресс, 2013.

2. Расчет на прочность корпуса АСУ: Техн. отчет / ГП "КБ "Южное", 2011.