

**ПОСТРОЕНИЕ РАЗВЕРТКИ ВНЕШНЕГО ВИДА
СПУСКАЕМОГО АППАРАТА КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ
«СОЮЗ» НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ФОТОГРАФИЙ
ДЛЯ ПОСЛЕПОЛЕТНОГО АНАЛИЗА
СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ**

©2016 г. Водолажский А.В., Калистратова О.В.

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

В статье описывается новый подход к анализу состояния теплозащитного покрытия спускаемого аппарата пилотируемого корабля «Союз». Разработана математическая модель, позволяющая на основании набора цифровых фотографий наружной поверхности спускаемого аппарата строить ее развертку. В основу модели заложен принцип перспективных преобразований трехмерного объекта при построении его проекции на видовую плоскость. Приведены условия и допущения при математической обработке фотографий. Описана методика фотографирования и построения развертки. Приведены примеры последующей обработки развертки для получения дополнительной информации по состоянию теплозащитного покрытия и полученные результаты. Показано, что использование указанной методики существенно улучшает точность построения схемы состояния теплозащитного покрытия и в значительной степени облегчает сравнительный анализ состояния теплозащитного покрытия разных аппаратов.

Ключевые слова: спускаемый аппарат, анализ состояния теплозащитного покрытия, цифровая обработка изображений, построение развертки.

**CONSTRUCTING AN UNFOLDING
OF THE EXTERNAL SURFACE OF A SOYUZ DESCENT
VEHICLE FROM DIGITAL PICTURES
FOR POST-FLIGHT ANALYSIS
OF THE THERMAL PROTECTIVE COATING**

Vodolazhskiy A.V., Kalistratova O.V.

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

The paper describes a new approach to the analysis of the condition of the thermal protective coating on the descent vehicle of Soyuz manned spacecraft. A math model was developed, which makes it possible to construct an unfolding of the outer surface of a descent vehicle using as a basis a set of its digital photographs. The model is based on the principle of perspective transformations of a 3D object when constructing its projection onto a visual plane. The paper provides conditions and assumptions for the math processing of the photographs. It describes the procedure for taking pictures and constructing the unfolding. It provides examples of subsequent processing of the unfolding to obtain additional information on the state of the thermal protective coating and obtained results. It was demonstrated that the use of the said procedure significantly improves the accuracy of constructing the map of the thermal protective coating condition, and, to a considerable degree, makes it easier to perform a comparative analysis of the thermal protective coating condition on different vehicles.

Key words: descent vehicle, analysis of thermal protective coating condition, digital processing of pictures, construction of unfolding.



ВОДОЛАЖСКИЙ А.В.



КАЛИСТРАТОВА О.В.

ВОДОЛАЖСКИЙ Александр Владиславович – ведущий инженер-технолог РКК «Энергия»,
e-mail: aleksandr.vodolazhskiy@rsce.ru
VODOLAZHSKIY Alexander Vladislavovich – Lead engineer-technologist at RSC Energia,
e-mail: aleksandr.vodolazhskiy@rsce.ru

КАЛИСТРАТОВА Ольга Владимировна – ведущий инженер РКК «Энергия»,
e-mail: olga.kalistratova@rsce.ru
KALISTRATOVA Olga Vladimirovna – Lead engineer at RSC Energia,
e-mail: olga.kalistratova@rsce.ru

Введение

При проведении пилотируемых полетов [1] необходима оценка состояния теплозащитного покрытия (ТЗП) спускаемого аппарата (СА) пилотируемого корабля «Союз» после летных испытаний. Ранее такую оценку проводили при визуальном осмотре, в ходе

которого составляли ориентировочную схему распределения температур по поверхности СА, основываясь на состоянии материалов ТЗП и сравнивая их с эталонами этих материалов, подвергнутыми воздействию различных температур (рис. 1). В дальнейшем полученные схемы-развертки используют для сравнения состояния поверхности ТЗП СА между собой.

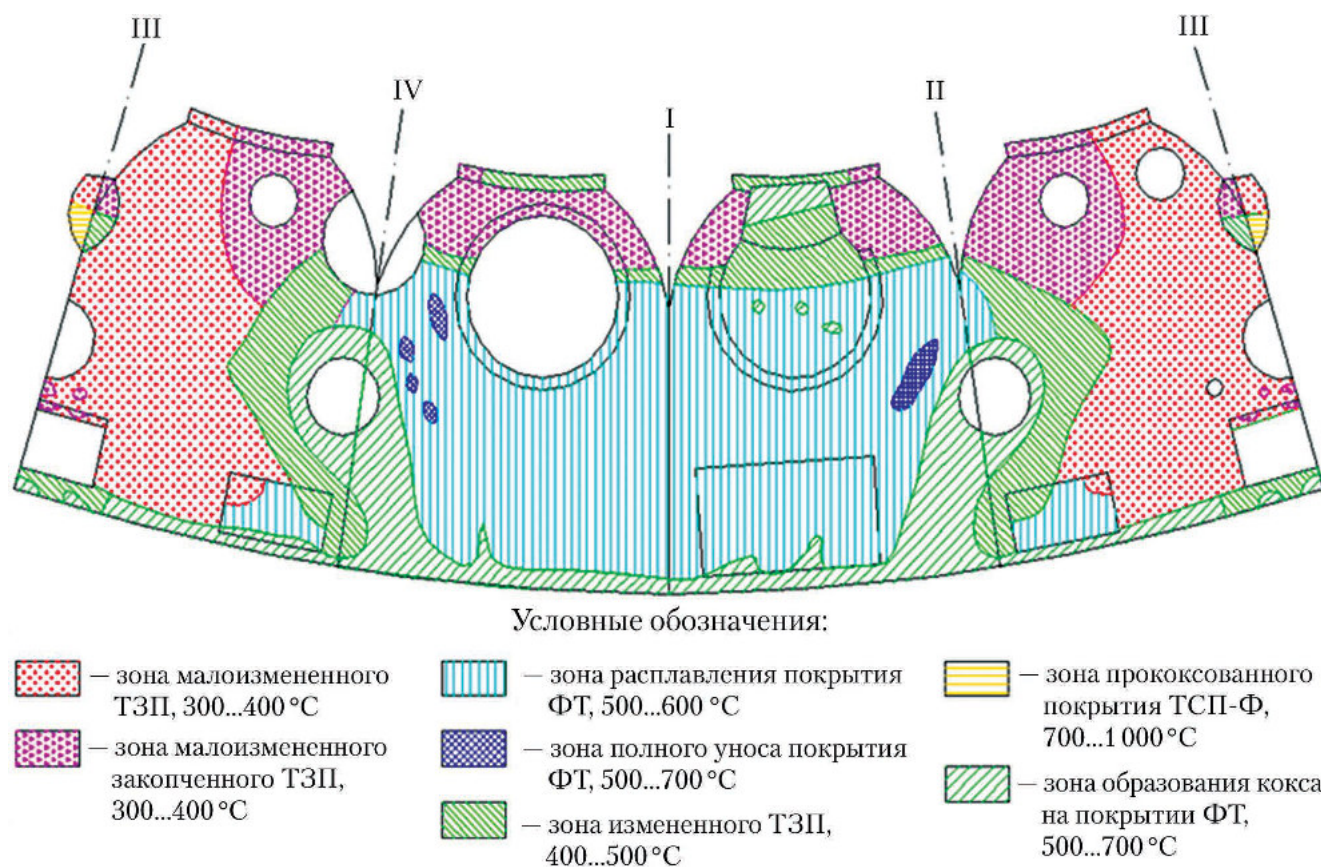


Рис. 1. Схема распределения температур и состояния теплозащитного покрытия (ТЗП) на боковой поверхности СА

Такой подход к анализу поверхности имеет ряд недостатков:

- большая погрешность определения положения границ зон с различным состоянием ТЗП из-за затруднения или большой трудоемкости их координатной привязки;
- приближительность количественной оценки состояния ТЗП (площади температурных зон, размеров дефектов, их ориентация относительно плоскостей СА), что значительно затрудняет возможность выявления взаимосвязи состояния поверхности СА с условиями его спуска.

Цель настоящей работы – построение развертки наружной поверхности и получение количественной информации по состоянию ТЗП СА на основании набора цифровых фотографий наружной поверхности СА.

Анализ литературных данных по этой теме показал, что аналогичные работы в открытых публикациях и патентах отсутствуют. Скорее всего, это связано со специфичностью задачи, так как исследования состояния теплозащитных покрытий после летных испытаний проводят только на возвращаемых космических аппаратах, производителем которых в настоящее время является РКК «Энергия».

Математическое обоснование

В основу построения развертки наружной поверхности спускаемого аппарата был заложен принцип перспективных преобразований трехмерных объектов [2].

Он базируется на следующем матричном преобразовании координат трехмерного объекта при построении его проекции на видовую плоскость:

$$[x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \left[\frac{x}{rz+1} \ \frac{y}{rz+1} \ 0 \ 1 \right].$$

Таким образом, точка с координатами $[x \ y \ z]$ при проецировании отображается на видовой плоскости в координатах:

$$[x \ y \ z] \xrightarrow{P} \left[\frac{x}{rz+1} \ \frac{y}{rz+1} \right],$$

где $r = -\frac{1}{z_c}$, z_c – координата центра проекции.

Принимая за видовую плоскость полученное изображение, можно построить условную схему проецирования (рис. 2).

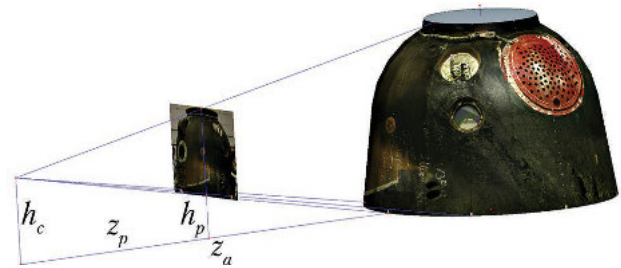


Рис. 2. Условная схема проецирования

Для расчета матрицы преобразования, а точнее, величины z_c , необходимо определить относительные координаты СА и изображения: h_c – высота центра проекции относительно нижней плоскости СА; h_p – превышение нижнего края изображения над нижней плоскостью СА; z_p – расстояние от центра проекции до видовой плоскости; z_a – расстояние от центра проекции до оси СА.

Для расчета этих величин и получения матрицы преобразования были приняты следующие условия съемки:

- ось объектива фотоаппарата должна быть горизонтальна;
- вертикальная ось СА должна быть перпендикулярна оси фотоаппарата;
- центр СА должен располагаться в плоскости СА–фотоаппарат.

При математической обработке фотографий использовались следующие допущения:

- СА представляет собой тело вращения, состоящее из двух усеченных конусов и сферического сегмента (не учитывается наличие выступающих частей, например, тангажного блока);
- полученные изображения подчиняются законам центральной проекции (не учитываются геометрические aberrации оптической системы фотоаппарата);
- условия съемки полностью соответствуют вышеизложенным (не учитываются отклонения СА от требуемого положения).

В качестве ключевых точек, координаты которых на СА и на изображении легко получить, были выбраны точки пересечения основных и промежуточных плоскостей ориентации с нижним и верхним срезами СА. Имея данные по геометрическим размерам СА и координатам ключевых точек на СА и изображении, можно построить систему уравнений, позволяющую рассчитать искомые координаты h_c , h_p , z_p , z_a и, далее, матрицу преобразования.

На основании выбранной математической модели было разработано программное обеспечение, позволяющее из восьми цифровых изображений СА, снятых с шагом 45° , сформировать вначале восемь секторов шириной 45° ($\pm 22,5^\circ$ от центральной плоскости) (рис. 3, а), а из них – полную развертку боковой поверхности СА (рис. 3, б).

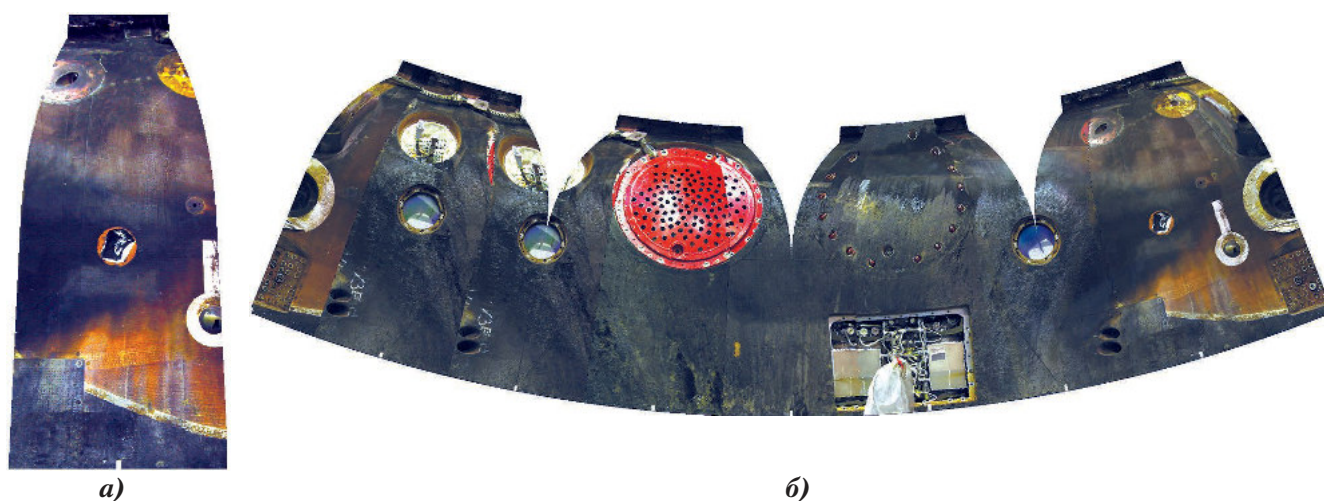


Рис. 3. Этапы построения развертки: а – сектор развертки; б – полная развертка боковой поверхности СА

Методика фотографирования и предварительной обработки изображений

При фотографировании СА для получения качественных изображений была разработана методика проведения фотосъемки. В качестве подготовительных операций производят выравнивание фотоаппарата в горизонтальной плоскости, выставление разметочных вешек для определения положения СА относительно фотоаппарата, предварительную разметку на СА основных (90°) и промежуточных (45°) плоскостей ориентации с помощью ярлычков, наклеиваемых на нижний срез СА. При фотографировании СА ориентируют в соответствии с разметкой относительно выставленных вешек для фиксации его центра относительно оси объектива фотоаппарата.

Полученные фотографии обрабатывают следующим образом:

- вырезают изображение СА;
- размечают ключевые точки на аппарате (вертикальная ось, положение промежуточных плоскостей);
- поворачивают изображение для частичной компенсации отклонений от требуемых условий съемки.

Получение и анализ развертки боковой поверхности СА

Полученные изображения СА последовательно загружают в разработанную программу обработки изображений. В ней указывают ключевые точки и, после расчетов относительных координат, программа накладывает на анализируемое изображение сетку 3D модели (рис. 4) для визуальной оценки корректности расчетов матрицы преобразования.



Рис. 4. Изображение СА с наложенной сеткой

Далее программа из изображения СА вырезает среднюю часть ($\pm 22,5^\circ$ от центральной оси проекции СА), преобразует каждую горизонталь поверхности СА в ее горизонтальную развертку и соединяет полученные строки в развертку $1/8$ поверхности СА (рис. 3, а). Из полученных восьми плоских разверток программа формирует условную развертку всей поверхности СА (рис. 3, б). Условная развертка СА базируется на развертке первой конической поверхности. Метод преобразования был выбран, исходя из необходимости сохранения площадей разворачиваемых элементов, при этом допускалось искажение их геометрических форм. Форма развертки (условное деление на сектора по плоскостям) была выбрана для сохранения совместимости с уже имеющимися схемами-развертками.

Методика последующей обработки полученной развертки заключается в следующем:

- на полученном изображении развертки выделяют технические элементы (люки, иллюминаторы, сопла двигателей и пр.), не относящиеся к теплозащите, и тросы подвески;
- оставшуюся часть развертки переводят из цветного изображения в градации серого и раскрашивают в псевдоцвета в соответствии с выбранной шкалой (рис. 5, а);
- на полученное изображение для удобства работы наносят контуры накладных

элементов (крышка люка парашютной системы, крышки двигателей крена и пр.).

Зоны разного цвета, полученные в ходе обработки, отражают различное состояние ТЗП на поверхности СА. Полученную развертку разделяют на два сегмента — сегмент с покрытием ФТ (рис. 5, б) и сегмент с покрытием ТСП-Ф. Каждый сегмент анализируют отдельно. Анализ изображений дает распределение по площадям каждой яркостной зоны и, соответственно, различного состояния ТЗП (рис. 6).

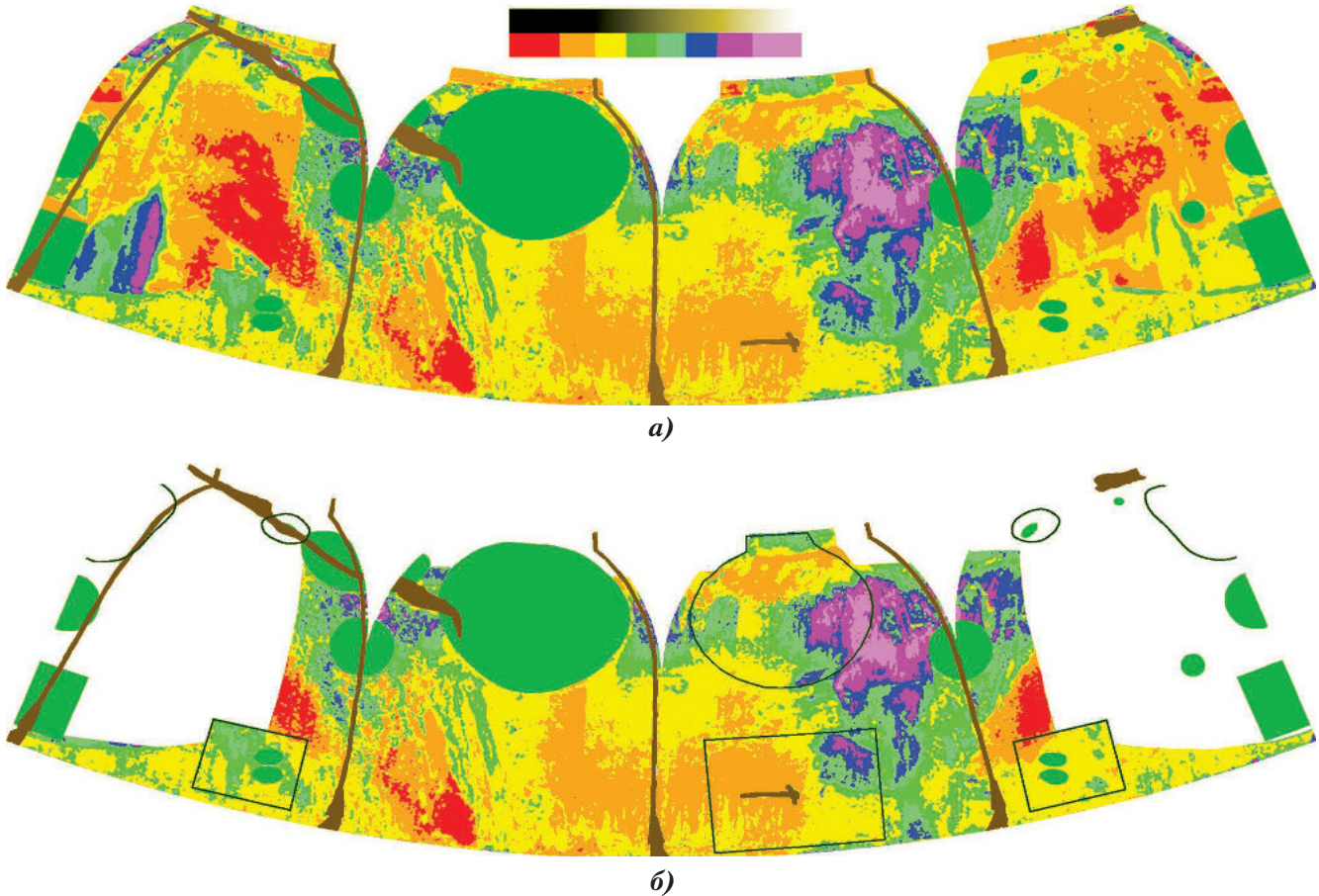


Рис. 5. Обработанное изображение развертки: а — полная развертка; б — сегмент с покрытием ФТ

Самой сложной задачей оказалась привязка цветовых зон на развертке к распределению температур на поверхности СА.

Для этого был проведен эксперимент по воздействию определенной температуры на образцы ТЗП (ФТ и ТСП-Ф). Полученные образцы были сфотографированы. На основе фотографий была построена зависимость яркости поверхности образца от температуры воздействия (рис. 7). Анализ зависимости показал, что она нелинейна и немонотонна, имеет локальные экстремумы, т. е. поверхность материала, подвергавшегося воздействию различных температур, может иметь одинаковую яркость. Основным фактором такой зависимости является образование на поверхности

материала под воздействием высоких температур хорошо отражающего слоя углерода. Кроме того, поверхность образцов после различного температурного воздействия имеет разную текстуру, которая также влияет на яркость поверхности. Таким образом, напрямую, только на основе фотографии, поставить в соответствие определенную яркость температурной зоне нельзя, необходимо опираться на визуальную оценку состояния материалов ТЗП на СА, связывая его с определенными цветовыми зонами на развертке. Кроме этого, значительные помехи в автоматической интерпретации цветовой картины развертки вносит наличие на поверхности копоти, налетов от разложения вспомогательных материалов и остатков

грунта. В качестве примера на рис. 5 фиолетовым цветом выделен участок поверхности СА с остатками грунта. В настоящее время ведутся работы по учету текстуры поверхности материала при обработке цветной развертки, что, как ожидается, даст дополнительную информацию о состоянии ТЗП и, следовательно, температурах на поверхности СА.

Первый вариант программы позволял получать развертки с разрешением 3 мм/пиксель.

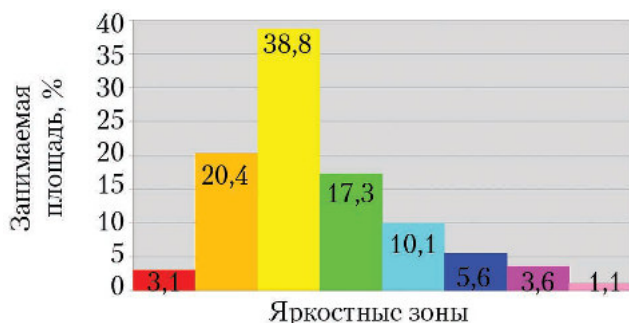


Рис. 6. Распределение яркостных зон по площадям для сегмента с покрытием ФТ

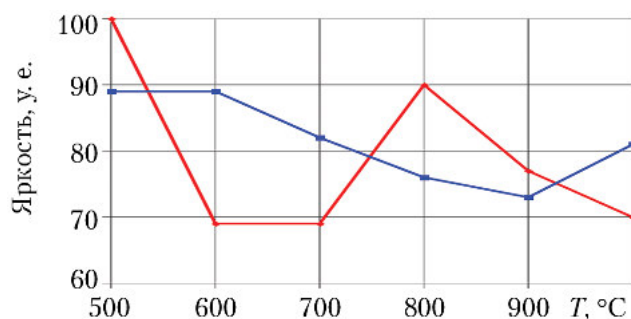


Рис. 7. Зависимость яркости поверхности от температуры воздействия для разных покрытий: — ФТ; — ТСП-Ф

В 2015 г. была проведена доработка программы, в результате чего улучшено разрешение развертки до 1 мм/пиксель и реализована возможность получения фрагментов развертки, приспособленных для их наложения на модель СА в *ProEngineer* (рис. 8). Это позволяет оценивать распределение аэродинамических потоков по поверхности СА, измерять углы обтекания и другие характеристики условий спуска.

С 2009 г. фотосъемка СА, обработка фотографий и построение развертки на их основе являются штатными операциями и введены в техническую документацию по работе с изделием.



Рис. 8. Наложение развертки на модель СА

Заключение

В ходе проведенной работы были разработаны методика расчетов и программа обработки цифровых изображений, позволяющие автоматизировать построение развертки боковой поверхности СА, что существенно (с трех до одного дня) сократило трудоемкость и значительно (от 100 до 5 мм) увеличило точность построения границ различных температурных зон на поверхности СА. Кроме того, цифровая обработка развертки позволяет получать большее количество данных по состоянию боковой поверхности СА и, при необходимости, проводить сравнение состояния поверхностей различных СА с гораздо большей точностью. Разработанная методика расчетов позволит после незначительной доработки проводить подобные работы и с возвращаемым аппаратом пилотируемого транспортного корабля нового поколения.

Список литературы

1. Деречин А.Г., Синявский В.В., Сорокин И.В. Развитие пилотируемой космонавтики / В кн.: С.П. Королев — энциклопедия жизни и творчества. Королёв: РКК «Энергия», 2014. С. 152–188.

2. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 606 с.

Статья поступила в редакцию 09.06.2016 г.

Reference

1. Derechin A.G., Sinyavskiy V.V., Sorokin I.V. *Razvitie pilotiruemoy kosmonavtiki*. In: S.P. Korolev — *entsiklopedia zhizni i tvorchestva*. [Progress of manned space exploration. In: S.P. Korolev — Encyclopedia of life and creation]. Korolev, RSC Energia publ., 2014. P.152–188.

2. Rogers D., Adams J. *Matematicheskie osnovy mashinnoy grafiki* [Mathematical elements for computer graphics]. Moscow, Mir publ., 2001. 606 p.