

мативных данных о состоянии исследуемых наземных объектов.

Отсюда вытекает необходимость и актуальность создания методик, позволяющих осуществлять анализ качества цифровых изображений. Использование этих методик позволит повысить достоверность результатов оценок и правильно выбрать технические характеристики оптико-электронных систем.

В диссертационной работе планируется получить новое решение актуальной научно-технической задачи, связанной с оценкой основных показателей информативности ОЭС космической системы ДЗЗ в видимом и ИК-диапазоне спектра.

Целью исследований является повышение уровня достоверности априорных и апостериорных оценок основных показателей информативности ОЭС.

Объектом исследования являются методы повышения параметров информативности опти-

ко-электронной системы высокого разрешения в видимом и инфракрасном диапазоне для задач ДЗЗ из космоса.

Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- Разработка математической модели оптико-электронного тракта с определением оптимальных исходных параметров системы.
- Проверка адекватности модели с проведением экспериментальных исследований.
- Анализ полученных результатов и сопоставление их с данными лётных испытаний.
- Разработка методов контроля выходных параметров системы.

Реализация поставленных целей и задач исследования планируется в рамках выполнения совместных национальных и межгосударственных НИОКР и научно-технических проектов, планируемых к выполнению в ОАО «Пеленг».

УДК 535.016

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕРКАЛА В ПРИБОРЕ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Ломако А.А.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

В процессе проектирования оптических систем для авиационных и космических приложений возникает необходимость проведения предварительных модельных расчетов с целью выявления величин возможных деформаций, параметров жесткости и запаса прочности разрабатываемой конструкции.

В данной работе рассматривается вариант трёхточечного крепления на примере плоского зеркала, которое участвует в формировании изображения с помощью объектива с фокусным расстоянием 400 мм и апертурой 90 мм. Зеркало, являясь частью оптической системы, должно удовлетворять высоким требованиям к качеству отражающей поверхности, а система его крепления должна обеспечивать сохранение параметров плоскостности.

Актуальность исследуемого вопроса состоит в том, что для приборов авиационного и космического базирования необходимо совмещать требования жесткости и максимального уменьшения массогабаритных параметров, что является взаимоисключающими категориями. Тем не менее, при решении конкретной практической задачи, возможно найти вариант реализации системы крепления и параметров зеркала так, чтобы одновременно удовлетворить всем требованиям.

Проблеме решения противоречивых требований к конструированию приборов космического и авиационного базирования посвящен учебник [1],

в котором изложены основные аспекты и даются соответствующие рекомендации. В частности, оговариваются способы крепления плоских зеркал, которые для небольших зеркал (до 800 мм) не сильно отличаются от способов крепления зеркал согласно справочнику [2].

Например, основными рекомендациями к параметрам и условиям закрепления плоских зеркал согласно [1, 2] являются:

- $d = (1/8 - 1/10) \cdot l$ , где  $d$  – толщина зеркала,  $l$  – наибольший размер или диаметр;
- СКО формы поверхности от расчетной не более 0.01 мкм;
- Стекло марки К8;
- Условие статической определенности соединения (опора на три точки);
- Эластичность соединения;
- Компенсация воздействий колебаний температуры;
- Возможность регулировки величин замыкающих усилий.

Однако не все эти рекомендации могут быть удовлетворены одновременно. Например, ограничения по массе, а также требование к минимальному размеру большого зеркала могут заставить сократить толщину зеркала и отступить от рекомендации номер один, ограничение по составу используемого материала также может

существенно изменить постановку задачи. Рекомендация касательно среднеквадратичного отклонения (СКО) формы поверхности от плоскости в 0.01 мкм на первый взгляд не кажется чем-то невыполнимым.

С целью количественной оценки параметров деформации зеркала, в данной работе рассматривается совокупность модельных расчетов, позволяющая получить представление о порядке величин деформаций зеркала, а также о параметрах жесткости и запасе прочности разрабатываемой конструкции.

Жесткость конструкции является важным требованием, так как в условиях выведения полезной нагрузки на низкую околоземную орбиту, аппаратура подвергается воздействию колебаний преимущественно в диапазоне низких частот (до 40–50 Гц), поэтому крайне нежелательно иметь в составе аппаратуры механические системы с частотами собственных резонансных колебаний ниже 50 Гц. Следовательно, на этапе проектирования оптико-механической системы важно рассчитать резонансные частоты собственных колебаний.

Кроме того, необходимо учитывать прочность конструкции, так как в моменты отделения ступеней, аппаратура может испытывать ударную нагрузку 30–40 г в течение нескольких мс. Поэтому важно представлять величину запаса прочности разрабатываемого оптико-механического узла.

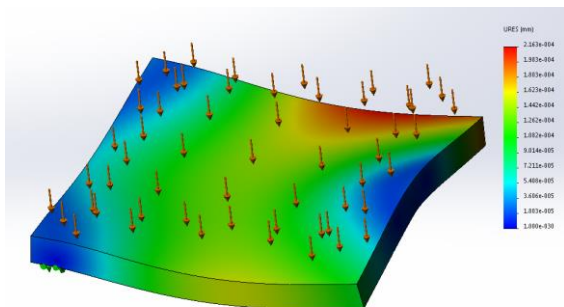


Рисунок 1 – Деформация плоского стекла под действием силы тяжести

На примере плоского зеркала ниже представлены результаты расчетов параметров деформации, жесткости и запаса прочности для системы крепления плоского зеркала в условиях МКС. Моделирование проводилось в САПР *SolidWorks 14*.

Проводя моделирование распределения деформаций для стекла марки К8 размерами 200×200×16 мм (рисунок 1) можно оценить величину средней деформации: стекло на 3-х опорах под действием собственного веса деформируется в пределах от 0.1 мкм (зеленый цвет на рисунке 1) до 0.2 мкм (красный цвет). Аналогичное моделирование для

алюминиевого сплава 200×200×8 мм дает величину деформации в пределах 0.3–0.7 мкм.

Таким образом, рекомендация 0.01 мкм для СКО формы поверхности от расчетной согласно [1] предстает совершенно в ином свете. Выполнение этой рекомендации осуществляется для больших зеркал телескопов мирового уровня. Для задач ДЗЗ с борта МКС, СКО формы поверхности плоского зеркала величиной 0.1 мкм можно взять в качестве отправной точки вместо величины 0.01 мкм.

Прочностные характеристики зеркала исследовались также при статическом воздействии ускорения свободного падения 40 g. Исследование показало, что стекло марки К8 размерами 200×200×16 мм деформируется на 5–8.6 мкм, аналогичное стекло размерами 200×200×8 мм деформируется на 9–29 мкм. Запас прочности в первом случае составляет 414 раз, во втором – 370 раз.

Интересно отметить, что стеклянное зеркало довольно трудно разрушить, прикладывая статическую нагрузку. Например, прикладывая усилие 400 кгс в центр закрепленного в трех точках стекла марки К8 размерами 200×200×16 мм на площади круга диаметром 5 см, стекло не разрушится. Более того, еще остается запас прочности 5.2–7.5 раз (в зависимости от критерия разрушения).

Для стекла марки К8 размерами 200×200×8 мм прикладывая статическое усилие 400 кгс на площади круга диаметром 5 см оставит запас прочности 1.8 раз.

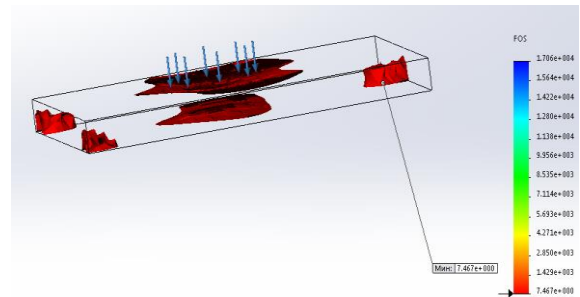


Рисунок 2 – Напряжения плоского стекла толщиной 16 мм под действием силы 400 кгс. Цветом показан минимальный запас прочности

Если сравнивать деформации стекла и алюминиевого сплава под действием силы тяжести, то они оказываются практически идентичными при одинаковой толщине материала.

Результаты выполнения частотного анализа для зеркала из стекла марки К8 размером 200×200×16 мм (образец 1) и размером 200×200×8 мм (образец 2) как механических систем представлен в таблице 1.

Анализируя данные таблицы 1 можно сделать вывод о том, что резонансные частоты собственных колебаний образцов 1 и 2 лежат за границей частот тех колебаний, которые могут войти в резонанс и навредить стеклянному зеркалу.

Таблица 1 – Массовое участие

Образец	Частота, Гц	X	Y	Z
1	1412.4	3.4e-4	6.5e-4	0.748
2	699	8e-9	8.2e-8	0.802

Интерес представляет также вопрос взаимодействия рамки крепления и связанной с этим деформации зеркала. Исследовались деформации рамки, которые возникают при фиксации прижимов зеркала образца 2 и их возможное влияние на геометрию зеркала. С этой целью, к трем креплениям прикладывались силы величиной 250 Н, после чего анализировались величины деформации зеркала.

На рисунке 3 схематично представлен вариант исполнения крепления для зеркала образца 2.

При таком способе крепления зеркала разница в перемещениях точек плоскости зеркала вдоль оси Z (по нормали к отражающей плоскости зеркала) достигает величины 4 мкм, а отклонение от плоскостности около 1 мкм что примерно в 2 раза больше по величине вклада в деформацию, создаваемой силой тяготения.

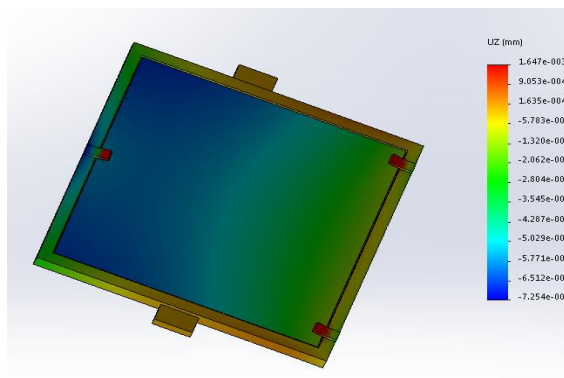


Рисунок 3 – Перемещение по оси Z в результате прижима зеркала

#### Литература

- Маламед, Е.Р. Конструирование оптических приборов космического базирования. / М.Т. Прилепин, А.Н. Голубев. – СПб. : СПбГИТМО(ТУ), 2002. – 291 с.
- Справочник конструктора оптико-механических приборов / В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др. : Под общ. ред. В.А. Панова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отделение, 1980. – 742 с.