

УДК 520.2.01; 681.782.8

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИКИ ОБЪЕКТИВА ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «ЛИРА-Б»

© В. П. Смекалин, В. Н. Федосеев, Ю. И. Шанин, Д. А. Ягнятинский

*Научно-исследовательский институт
«Научно-производственное объединение «Луч»»,
142103, г. Подольск Московской обл., ул. Железнодорожная, 24
E-mail: day@luch.com.ru*

Представлены конечно-элементные математические модели реального и упрощённого объективов телескопа космического эксперимента «Ли́ра-Б». Приведены результаты расчётов механики объектива при воздействии на него различных внешних нагрузок: как статических, так и динамических. Расчёты выполнены с помощью программного комплекса ANSYS. Описаны три способа определения характеристик облегчённых конструкций деталей объектива, два из которых использованы в расчётах. Сравнение результатов, полученных с помощью реальной и упрощённой (приведённой) моделей, указывает на возможность применения упрощённой модели для начальных оценочных расчётов. При этом такая модель, обладающая приведёнными характеристиками, более проста в построении и генерации конечно-элементной сетки и требует существенно меньше расчётного времени.

Ключевые слова: объектив телескопа, расчёты механики, внешние нагрузки, ANSYS, математические модели, приведённые характеристики.

DOI: 10.15372/AUT20190517

Введение. В [1] описаны принципы и цели осуществления космического эксперимента «Ли́ра-Б» на борту международной космической станции (МКС), разработанного в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга (ГАИШ) МГУ. Целью эксперимента является проведение высокоточного многоцветного фотометрического обзора всех объектов на небесной сфере со звёздной величиной от 3^m до 16^m . В ходе эксперимента (планируемая длительность от 3,5 до 5 лет) предполагается произвести многократные фотометрические измерения объектов в 10 спектральных полосах примерно от 200 до 1000 нм. Таким образом, кроме современных телескопов наземного базирования [2], в России активно развивается альтернативное направление — применение космических телескопов.

Параметры телескопа, который планируется использовать в эксперименте «Ли́ра-Б», определяются целями эксперимента и техническими ограничениями со стороны МКС. Габариты инструмента задаются способом его доставки и монтажа на МКС. Научная аппаратура на МКС доставляется грузовым космическим кораблём «Прогресс», который выводится на околоземную орбиту и стыкуется со станцией. С учётом ограничений, накладываемых размерами отсеков и люков «Прогресса» и МКС, диаметр главного зеркала телескопа не может превышать $0,5 \pm 0,01$ м.

Для реализации объектива телескопа была принята широко используемая сегодня оптическая схема Ричи — Кретъена с афокальным линзовым корректором [3]. Здесь рассматриваются некоторые результаты практической реализации такого объектива. В работе проведён расчётный анализ с помощью программного комплекса ANSYS некоторых задач механики для полной (реальной) и упрощённой математических моделей объектива. Расчёты выполнены в рамках технического задания для разработки конструкторской

документации на оптические и конструкционные детали оптико-механических частей комплекса научной аппаратуры многоцветного фотометрического обзора неба.

Основной целью данного исследования является разработка и апробация методики расчёта на прочность как элементов, так и всего объектива телескопа, предназначенного для космического эксперимента «ЛИРА-Б». Эта методика позволяет также выбрать упрощённую (приведённую) конструкцию и существенно снизить время вычислений. Путём определения основных приведённых размеров элементов объектива и дальнейшего численного моделирования в программном комплексе ANSYS удалось установить модели, которые могут быть использованы для прочностного анализа объектива.

Конструкция и математические модели объектива телескопа.

Конструкция объектива. В состав конструкции объектива телескопа входят следующие оптические и конструкционные детали (рис. 1, а): главное зеркало (ГЗ), основание главного зеркала, вторичное зеркало (ВЗ), основание вторичного зеркала, стойки. Главное и вторичное зеркала крепятся на своих основаниях, соединённых тремя стойками.

В качестве материала для деталей объектива телескопа планируется использовать реакционно спечённый карбид кремния, который имеет высокую жёсткость, что позволяет изготовить из него тонкие и лёгкие зеркала, основания и стойки и уложиться в конструктивные ограничения по массе. Также он обладает высокой температуропроводностью, т. е. детали (главное — зеркала) из этого материала характеризуются малыми температурными искажениями формы и быстро приходят в состояние теплового равновесия. Из недостатков следует отметить, что карбид кремния является керамикой и хорошо работает на сжатие, но плохо на растяжение.

Главное афокальное (гиперболическое) зеркало с радиусом ближней сферы $-1977,4$ мм, с внешним диаметром 505 мм и внутренним отверстием диаметром 210 мм имеет подложку 7 мм и облегчённую тыльную сторону (рис. 1, б). Облегчение выполнено в виде рёбер толщиной 3 мм, расположенных с шагом $49,5$ мм в трёх направлениях относительно друг друга под углом 120° и образующих равносторонние треугольники. Главное зеркало с тыльной стороны имеет фланец с шестью отверстиями и крепится болтами к основанию.

Вторичное афокальное (гиперболическое) зеркало с радиусом ближней сферы $+879,8$ мм, с внешним диаметром 175 мм и внутренним отверстием диаметром 20 мм имеет подложку 6 мм и облегчённую тыльную сторону (рис. 1, в). Облегчение выполнено в виде рёбер толщиной 3 мм, расположенных с шагом 42 мм в трёх направлениях относительно друг друга под углом 120° и образующих равносторонние треугольники. В три отверстия с тыльной стороны ВЗ устанавливаются втулки, которые крепятся к основанию.

Подборки (детали) ГЗ и ВЗ крепятся болтовыми соединениями между собой с помощью трёх стоек. Во все крепёжные отверстия вклеены втулки из кобальта. Собранный объектив жёстко крепится к главному шпангоуту телескопа с помощью трёх втулок, вклеенных в основание ГЗ.

Математические модели объектива. Для проведения расчётов были построены конечно-элементные модели (КЭМ) отдельных деталей объектива: ГЗ, основание ГЗ, ВЗ, основание ВЗ. Также была построена КЭМ всего объектива, включая соединительные детали. Здесь рассматриваются только результаты расчётов для ГЗ, ВЗ и всего объектива. Для оценки точности применяемых КЭМ рассмотрены две верификационные задачи, имеющие точные аналитические решения: расчёт напряжений и перемещений вертикально подвешенного за торец стержня под действием собственного веса и определение первой собственной частоты колебаний круглой сплошной пластинки, защемлённой по контуру. Максимальная погрешность по сравнению с аналитическим решением не превышала $0,2\%$ для первого случая и $0,4\%$ для второго. Также было получено хорошее совпадение результатов (с отличием в несколько процентов) с данными некоторых статических расчётов, проведённых для аналогичной модели сотрудниками ГАИШ МГУ.

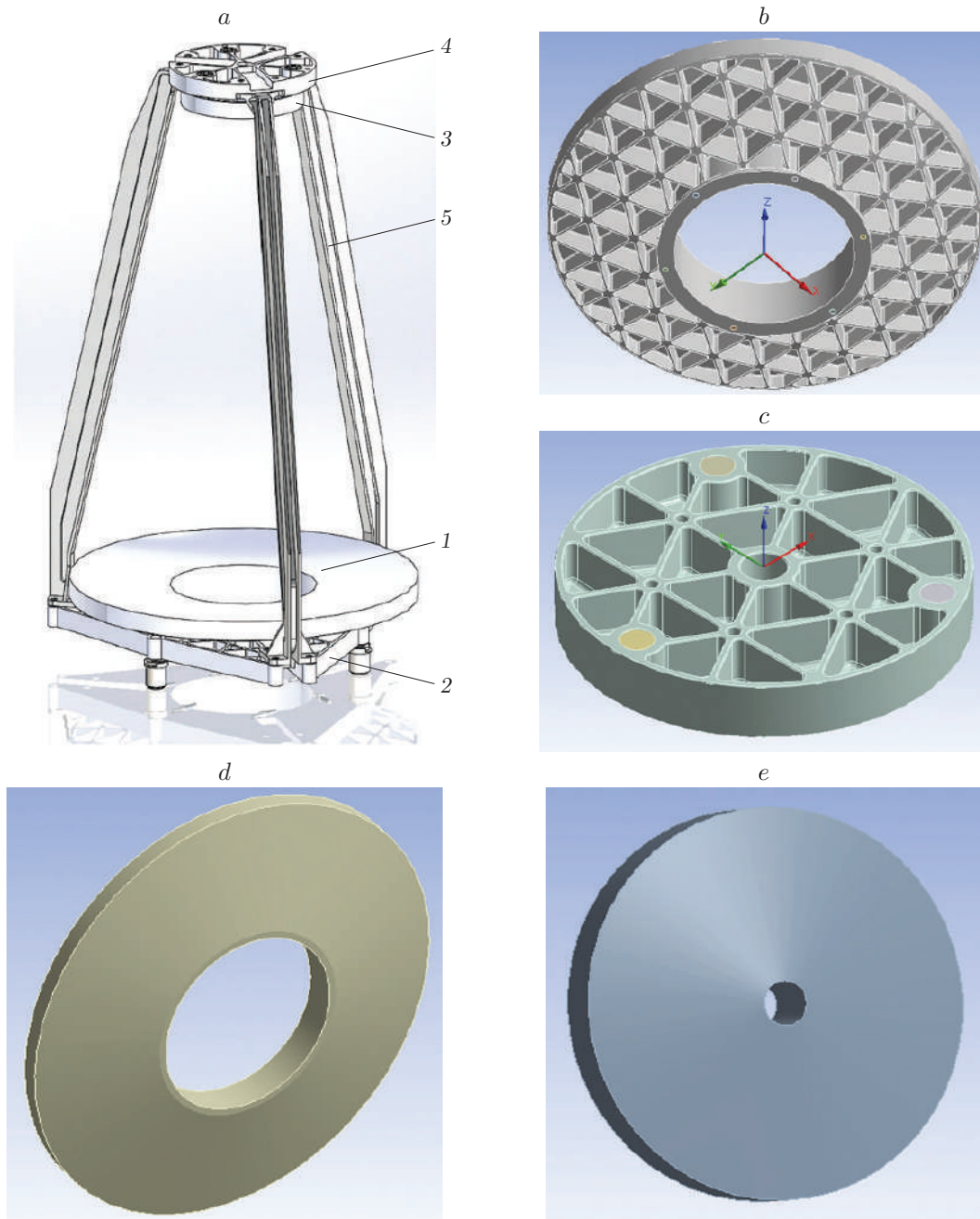


Рис. 1. 3D-изображение объектива телескопа: *a* — сборка (1 — главное зеркало, 2 — основание главного зеркала в сборе, 3 — вторичное зеркало, 4 — основание вторичного зеркала в сборе, 5 — стойка); *b* — тыльная сторона главного зеркала; *c* — тыльная сторона вторичного зеркала; *d* — упрощённая конструкция ГЗ; *e* — упрощённая конструкция ВЗ

Таблица 1

Характеристики КЭМ

Элемент конструкции	Число узлов	Число элементов
Объектив	608329	351473
ГЗ	654992	370340
Основание ГЗ	278975	160178
ГЗ + основание ГЗ	952140	543389
ВЗ	106604	60067
Основание ВЗ	69181	38848
ВЗ + основание ВЗ	276696	169222
Стойка	384176	234267

Модель реального объектива. Под моделью реального объектива понимается модель, разработанная в программном комплексе SolidWorks и использующая конструкторские чертежи деталей с некоторыми упрощениями в узлах крепления и переданная в среду ANSYS через STEP-файл.

Начало базовой системы координат XYZ для модели объектива расположено в центре отверстия основания ГЗ. Ось X направлена от центра сечения одной из крепёжных втулок к находящейся напротив стойке основания вторичного зеркала, а ось Z — вдоль главной оптической оси от ГЗ к ВЗ. Ось Y перпендикулярна осям X и Z и направлена так, что оси X, Y, Z образуют правую систему координат.

Конечно-элементные модели деталей, сборок и всего объектива содержат количество узлов и элементов, указанное в табл. 1. Для КЭМ ГЗ и ВЗ, закреплённых на основаниях, а также для стоек использована более мелкая сетка для правильной оценки перемещений поверхности под действием собственного веса.

В КЭМ содержатся два материала: для каждого материала задаются плотность, модуль Юнга и коэффициент Пуассона (6 свойств).

Детали объектива моделируются наборами объёмных тетраэдрических элементов типа Tetrahedral из карбида кремния со следующими физико-механическими характеристиками: плотность $\rho = 3000 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости (Юнга) $E = 370 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,18$, предел прочности равен 390 МПа , предел изгибной прочности составляет 350 МПа .

Модель объектива получена объединением моделей деталей: ГЗ, ВЗ, оснований ГЗ и ВЗ, трёх стоек, соединяющих основания ГЗ и ВЗ. Остальные материалы, заданные в модели, — присоединительные элементы, изготовленные из ковара.

Сопряжение и закрепление объектива с главным шпангоутом телескопа происходит с помощью трёх цилиндрических втулок диаметром 30 мм и высотой 30 мм , расположенных на основании главного зеркала.

Объектив с приведёнными свойствами материалов его элементов. Облегчённые зеркала для телескопов могут выполняться по различным схемам. Для них характерно наличие облегчённого слоя с внутренними полостями. Зеркало рассматривается как пакет различных слоёв. При наличии передней и тыльной пластины зеркало рассматривается как «сэндвич». Широко распространена также конструкция зеркала, у которого отсутствует тыльная пластина, и именно такой случай реализован в ГЗ и ВЗ.

Внутренние полости ослабляют изгибную жёсткость зеркала и приводят к увеличению изгибной составляющей искажений. Этот фактор учитывают введением в расчётные формулы поправочного коэффициента $k_{\text{осл}}$, представляющего собой отношение изгибной жёсткости пластины, ослабленной внутренними полостями, к изгибной жёсткости сплошной пластины. Коэффициент $k_{\text{осл}}$ должен рассчитываться исходя из конкретной конструк-

пии зеркала. Обычно при расчётах изгибной жёсткости принимают, что приведённый модуль упругости в заданном сечении зеркала равен $E_{\text{пр}} = k_{\text{обл}}E$, где $k_{\text{обл}}$ — коэффициент заполнения (облегчения) в данном сечении [4]. Рассмотрим расчёт изгибной жёсткости сотовой конструкции силового зеркала, состоящей из сплошной подложки толщиной $h_{\text{в}}$ и сплошного основания толщиной $h_{\text{н}}$, соединённых между собой сотовым пакетом с коэффициентом заполнения $k_{\text{обл}}$ [5]. В конечном итоге коэффициент ослабления изгибной жёсткости сотовой конструкции $k_{\text{осл}}$ с общей высотой H можно выразить в следующем виде:

$$k_{\text{осл}} = 4\{\delta_1^3 + \delta_2^3 - (1 - k_{\text{обл}})[(\delta_1 - h_{\text{в}})^3 + (\delta_2 - h_{\text{н}})^3]\}/H^3, \quad (1)$$

$$\delta_1 = 0,5\{H^2 - (1 - k_{\text{обл}})[(H - h_{\text{н}})^2 - h_{\text{в}}^2]\}/[k_{\text{обл}}H + (1 - k_{\text{обл}})(h_{\text{в}} + h_{\text{н}})], \quad (2)$$

$$\delta_2 = 0,5\{H^2 - (1 - k_{\text{обл}})[(H - h_{\text{в}})^2 - h_{\text{н}}^2]\}/[k_{\text{обл}}H + (1 - k_{\text{обл}})(h_{\text{в}} + h_{\text{н}})], \quad (3)$$

где δ_1 и δ_2 — нижняя и верхняя эффективные толщины сотовой конструкции при интегрировании для расчёта изгибной жёсткости.

Для частного случая, когда $h_{\text{в}} = h_{\text{н}} = h$,

$$k_{\text{осл}} = 1 - (1 - k_{\text{обл}})(1 - 2h/H)^3, \quad (4)$$

и в нашем случае, когда $h_{\text{н}} = 0$, для ГЗ имеем $k_{\text{обл}} = 0,228$, $k_{\text{осл}} = 0,381$, для ВЗ — $k_{\text{обл}} = 0,272$, $k_{\text{осл}} = 0,458$.

Рассмотрим другой подход к определению характеристик облегчённых астрономических зеркал [6]. Приведённая изгибная толщина облегчённого зеркала $t_{\text{пр}}$, открытого с тыльной стороны, рассчитывается по формуле

$$t_{\text{пр}} = \sqrt[3]{[(1 - 0,5\eta)(t_{\text{пл}}^4 - 0,5\eta h_{\text{р}}^4) + 0,5\eta(t_{\text{пл}} + h_{\text{р}})^4]/(t_{\text{пл}} + 0,5\eta h_{\text{р}})}, \quad (5)$$

где $t_{\text{пл}}$ — толщина лицевой пластины, $h_{\text{р}}$ — средняя по диаметру высота ребра сотовой облегчённой структуры, η — коэффициент прочности ребра:

$$\eta = (2D + t_{\text{р}})t_{\text{р}}/(D + t_{\text{р}})^2, \quad (6)$$

$t_{\text{р}}$ — толщина ребра сотовой структуры, D — диаметр вписанной в сотовую треугольную структуру окружности $D = 2b/3$, b — высота равносторонней треугольной ячейки. Оценка массы зеркала M при данном подходе может быть сделана по формуле

$$M = \rho A(t_{\text{пл}} + \eta h_{\text{р}}), \quad (7)$$

где A — площадь зеркальной поверхности, ρ — плотность материала конструкции. Применительно к нашему случаю с помощью (7) получено для ГЗ $M_{\text{ГЗ}} = 6,84$ кг (реальная масса 7,18 кг), для ВЗ $M_{\text{ВЗ}} = 0,71$ кг (реальная масса 0,86 кг).

Толщину лицевой пластины при оптимизации изгибной жёсткости находят из решения уравнения [6]

$$4(t_{\text{пл}} + 0,5\eta h_{\text{р}})[(1 - 0,5\eta)(t_{\text{пл}}^3 - 0,5\eta h_{\text{р}}^3) + 0,5(\eta - 1)(t_{\text{пл}} + h_{\text{р}})^3] - \\ - 0,5[(1 - 0,5\eta)(t_{\text{пл}}^4 - 0,5\eta h_{\text{р}}^4) + 0,5\eta(t_{\text{пл}} + h_{\text{р}})^4] = 0. \quad (8)$$

Таблица 2

Приведённые характеристики облегчённых деталей объектива

Деталь объектива	α	$k_{обл}$	Примечание
ГЗ	0,111	0,228	За исключением лицевой пластины и фланца
Основание ГЗ	0,211	0,421	—
ВЗ	0,136	0,272	За исключением лицевой пластины
Основание ВЗ	0,254	0,508	—
Стойка	0,267	0,535	—

Решая (8), получаем для ГЗ $t_{плГЗ} = 1,74$ мм, для ВЗ $t_{плВЗ} = 1,18$ мм, т. е. для реальной конструкции толщины оптических пластин далеки от толщин, обеспечивающих оптимальную изгибную жёсткость зеркал. Увеличение толщин пластин выполнено из технологических соображений, так как сложно осуществить точную обработку тонких пластин афокальных зеркал из карбида кремния.

Ещё один упрощённый подход к моделированию астрономической оптики включает в себя учёт 3D-эффектов [6]. В этом подходе лицевые пластины для зеркала в виде «сэндвича» моделируются как сплошные пластины толщиной $t_{пл}$, расположенные в их истинном положении. Облегчённое ядро представляется в виде твёрдых элементов с приведёнными свойствами. Эффективные изотропные приведённые свойства рассчитывают по формулам

$$E_{пр} = \alpha E; \quad \nu_{пр} = \nu; \quad \rho_{пр} = 2\alpha\rho, \quad (9)$$

где α — отношение, характеризующее относительную плотность облегчённой структуры, которая может иметь решётчатые структуры с треугольными, квадратными или шестиугольными ячейками:

$$\alpha = t_p/D, \quad (10)$$

для ГЗ $\alpha_{ГЗ} = 0,111$, для ВЗ $\alpha_{ВЗ} = 0,136$.

В данной работе приведённые свойства облегчённых структур рассчитывались двумя способами (табл. 2) с учётом значений α и коэффициента облегчения $k_{обл}$. При построении упрощённых моделей с приведёнными свойствами материалов соблюдалось геометрическое подобие — основные размеры деталей (диаметры, толщины) и их контуры сохранялись. В ГЗ и ВЗ облегчённый слой заменялся сплошным гомогенным слоем с приведёнными физико-механическими характеристиками (см. рис. 1, d , e). В ГЗ из сплошного материала выполнены лицевая пластина и фланец крепления к основанию, в ВЗ — только лицевая пластина. Основания зеркал были заменены треугольной плитой с внутренним круглым отверстием (для ГЗ) и диском (для ВЗ). Так как жёсткостные характеристики конструкции при различных динамических нагрузках сильно влияют на её напряжённо-деформированное состояние, то были проведены варианты расчёты с реальными и упрощёнными стойками. В упрощённой модели стойки рассматривались как сплошной материал с приведёнными свойствами.

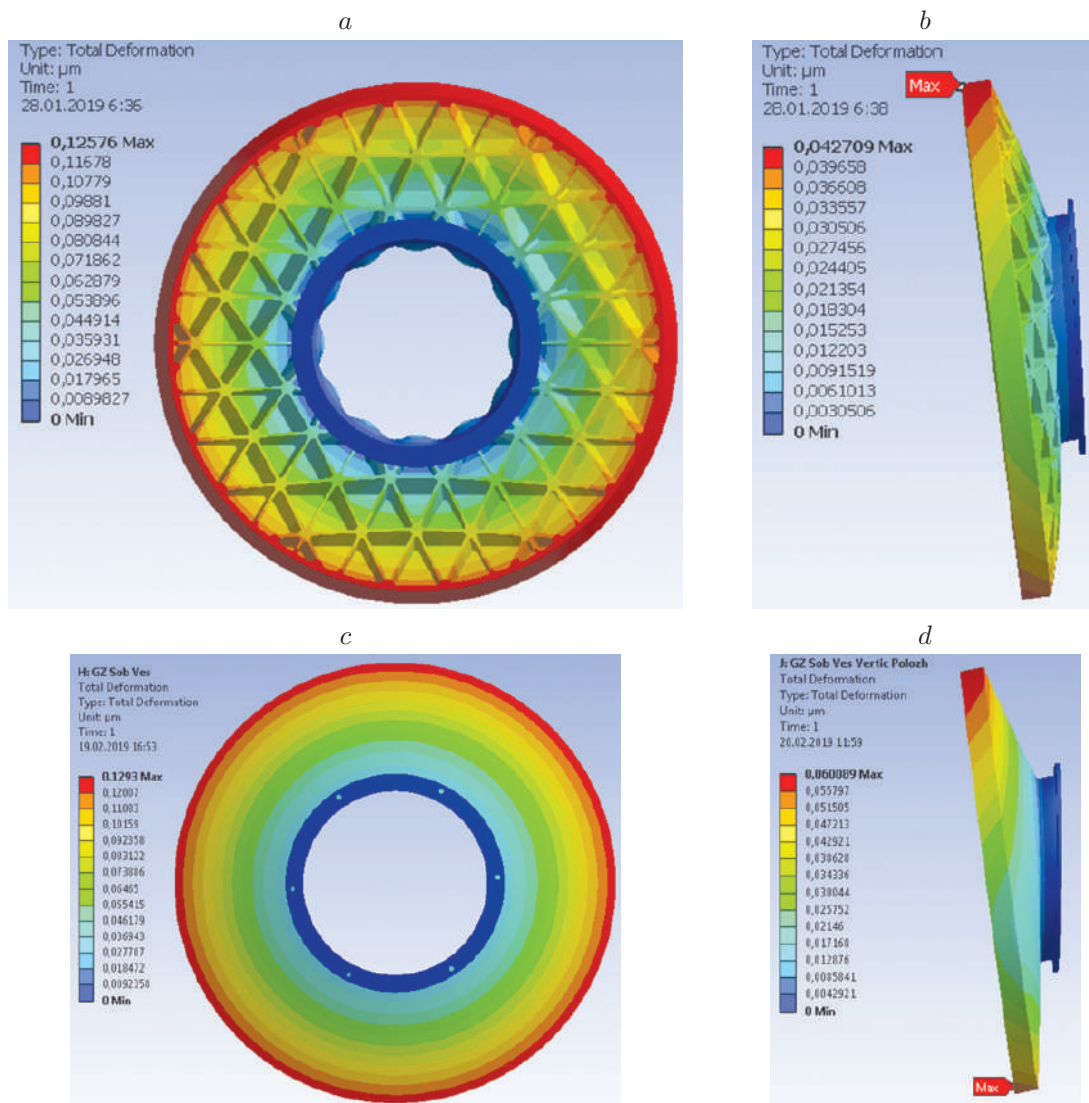


Рис. 2. Цветовые карты распределений значений полных перемещений для ГЗ (в мкм): *a, c* — в горизонтальном положении; *b, d* — в вертикальном положении; *a, b* — реальная модель; *c, d* — упрощённая модель

Результаты расчётов. Проведены статические расчёты прогибов зеркал и объектива в целом под действием собственного веса. Также были рассчитаны массо-инерционные характеристики модели объектива телескопа. С использованием разработанных КЭМ выполнен расчёт собственных частот колебаний конструкции объектива телескопа. Первая собственная частота у реальной модели 71,8 Гц, у упрощённых 67,2 Гц (расчёт по значениям α (см. табл. 2)) и 76,6 Гц (расчёт по значениям $k_{\text{обл}}$ (см. табл. 2)). Прочность конструкции рассчитывалась при следующих динамических нагрузках:

- воздействие гармонической вибрации в диапазоне частот 5–20 Гц с амплитудой виброускорения $0,72g$ и длительностью воздействия 150 с;
- воздействие случайной вибрации (частота от 20 до 2000 Гц), характерной для транспортно-грузового корабля «Прогресс» на участке его выведения ракетносителем на орбиту;
- воздействие эксплуатационных ударно-импульсных нагрузений в полёте.

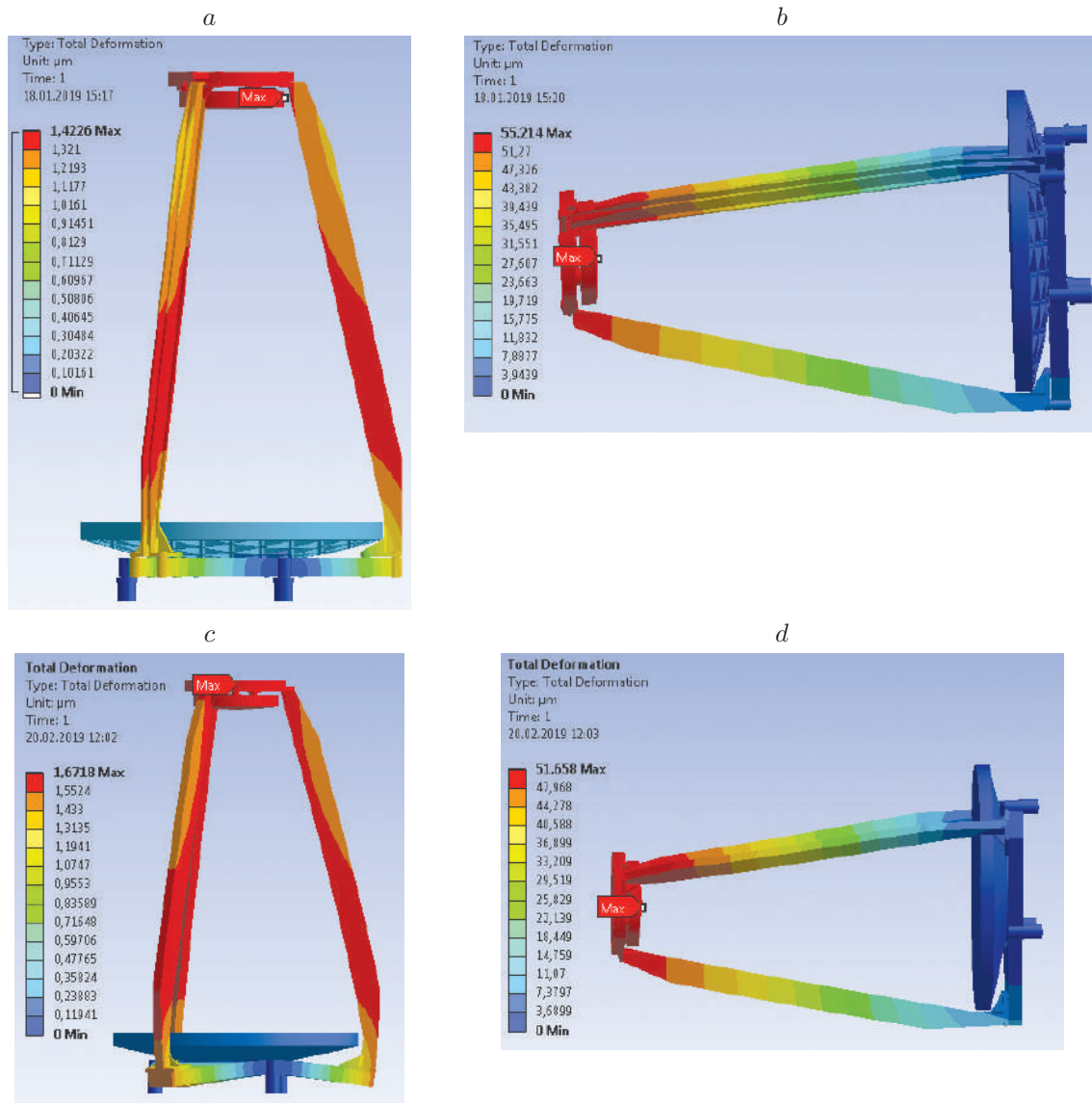


Рис. 3. Цветовые карты распределений полных перемещений для объектива телескопа (в мкм): *a, c* — в вертикальном положении; *b, d* — в горизонтальном положении; *a, b* — реальная модель; *c, d* — упрощённая модель

Расчёт зеркал. Прогиб ГЗ под действием собственного веса при двух положениях зеркала (горизонтальном и вертикальном) показан на рис. 2. Соответствие прогибов реальной и упрощённых моделей при горизонтальном расположении зеркала хорошее, при вертикальном — удовлетворительное.

Расчёты объектива. Предварительные расчёты показали, что стойки с приведёнными свойствами подходят для проведения статических расчётов. Для динамических расчётов необходимо брать реальные стойки, так как объектив телескопа представляет собой колебательную систему, свойства которой сильно зависят от конструктивного исполнения стоек.

Статическое нагружение собственным весом. Прогиб объектива под действием собственного веса при двух положениях (горизонтальном и вертикальном) показан на рис. 3. В вертикальном положении (рис. 3, *a*) для реальной модели максимальное перемещение

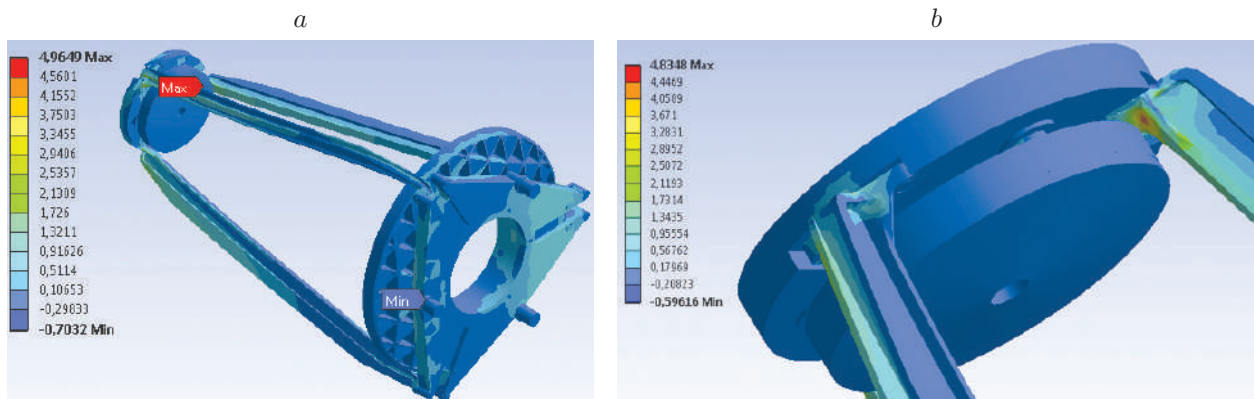


Рис. 4. Максимальные главные напряжения (МПа) при частоте гармонической вибрации 20 Гц: *a* — реальная модель; *b* — упрощённая модель

Таблица 3

Параметры случайной вибрации при длительности воздействия 60 с

Частота, Гц	Спектральная плотность виброускорения, $g^2/Гц$	Частота, Гц	Спектральная плотность виброускорения, $g^2/Гц$
20	0,0100	500	0,0250
50	0,0100	1000	0,0125
100	0,0100	2000	0,0065
200	0,0250		

равно 1,4 мкм, в горизонтальном положении (рис. 3, *b*) — 55,2 мкм. Для упрощённой модели 1,7 мкм (рис. 3, *c*) и 51,6 мкм (рис. 3, *d*) для вертикального и горизонтального расположения объектива соответственно. Прогнбы реальной и упрощённой моделей хорошо согласуются. Также было получено удовлетворительное сходство с результатами расчёта объектива, полученными в ГАИШ МГУ для реальной модели объектива (1,9 и 56 мкм).

Воздействие гармонической вибрации в диапазоне частот 5–20 Гц. В расчётах была задана гармоническая (синусоидальная) вибрация с амплитудой виброускорения $0,72g$ по оси X в диапазоне частот от 5 до 20 Гц. Длительность воздействия 150 с. Результатом расчётов стало определение максимальных главных напряжений в конструкции (рис. 4). Наибольшие по интенсивности напряжения возникают в месте сопряжения основания вторичного зеркала и стойки, находящейся на линии вдоль оси X (4,96 МПа), что происходит на частоте 20 Гц. На меньших частотах интенсивности напряжений становятся меньше. Запас прочности при воздействии гармонической нагрузки получается > 10 . Результаты по упрощённой модели (напряжение 4,83 МПа, расчёт по α (см. табл. 2) и 4,38 МПа, расчёт по $k_{обл}$ (см. табл. 2)) хорошо согласуются с реальной моделью (рис. 4, *a*).

Воздействие случайной вибрации. Параметры наиболее жёсткой случайной вибрации, соответствующие участку выведения объектива телескопа на ракетоносителе в грузовом отсеке транспортно-грузового корабля (ТГК) «Прогресс», приведены в табл. 3. Рассчитанные значения эквивалентных напряжений в конструкции при заданном воздействии случайной вибрацией на конструкцию реальной модели приведены на рис. 5, *a*. Максимальные по интенсивности эквивалентные напряжения (51 МПа) возникают в месте сопряжения основания вторичного зеркала и стойки. Коэффициент запаса по напряжению равен 6,9, что обеспечивает запас прочности 1,7 при значении коэффициента безопасности равном 4. Результаты по упрощённой модели (напряжение 44 МПа, расчёт по α (см. табл. 2) и 43 МПа,

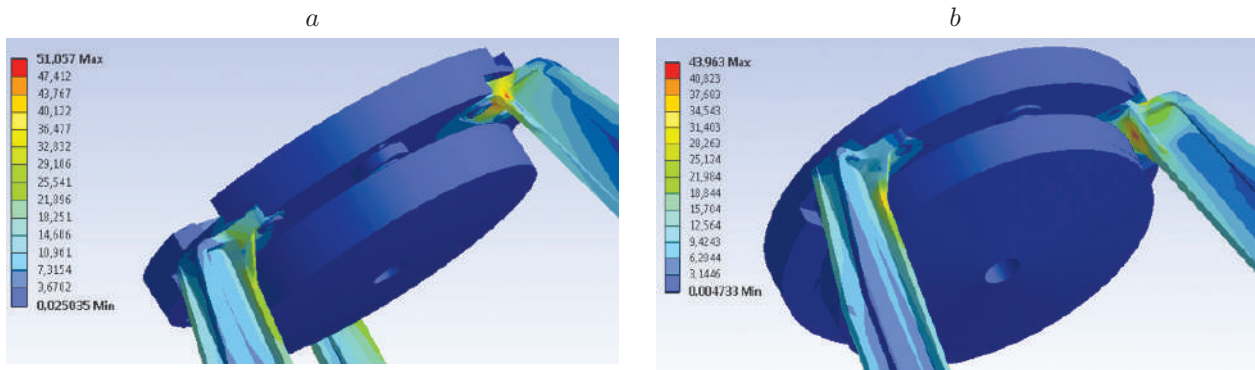


Рис. 5. Эквивалентные напряжения всей конструкции при случайной вибрации (МПа): *a* — реальная модель; *b* — упрощённая модель

Таблица 4

Эксплуатационные параметры ударно-импульсного нагружения

Нагружение	Выведение и полёт к МКС на корабле «Прогресс»
Ускорение	$\pm 26,7g$
Длительность импульса, мс	от 1 до 3
Количество ударов	По 7 ударов в каждом направлении и по каждой оси

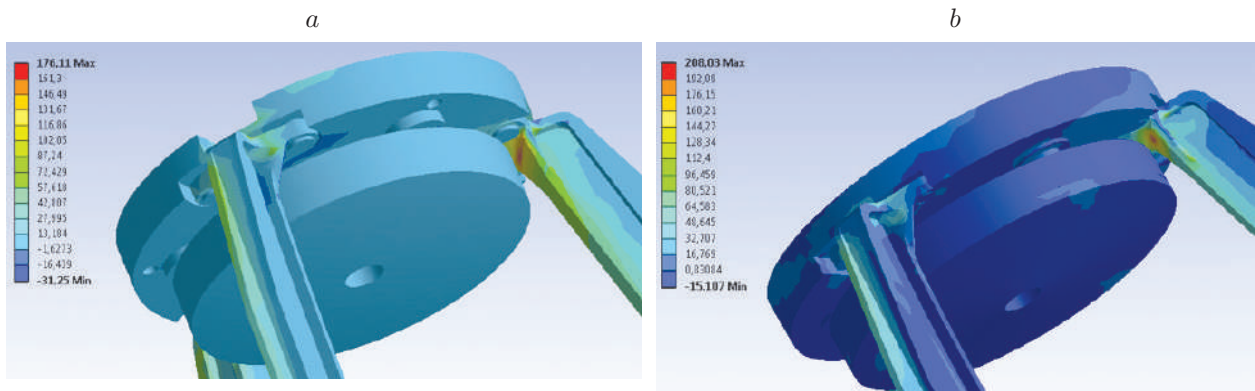


Рис. 6. Распределения главных напряжений в конструкции объектива при воздействии удара, направленного по оси *X* (МПа): *a* — максимальные главные напряжения в месте сопряжения стойки с основанием вторичного зеркала для реальной модели; *b* — распределение напряжений в упрощённой модели

расчёт по $k_{обл}$ (см. табл. 2)) удовлетворительно согласуются с реальной моделью.

Воздействие эксплуатационных ударно-импульсных нагрузжений. Параметры ударно-импульсного нагружения даны в табл. 4. Распределение напряжений при ударе вдоль оси X (максимальное напряжение 176 МПа) приведено на рис. 6. Коэффициент запаса по напряжению при ударе вдоль оси X равен 2,0, что обеспечивает запас прочности 1,3 при значении коэффициента безопасности 1,5. Результаты по упрощённой модели (напряжение 208 МПа, расчёт по α (см. табл. 2) и 217 МПа, расчёт по $k_{обл}$ (см. табл. 2)) удовлетворительно согласуются с реальной моделью.

Заключение. В данном исследовании разработаны КЭМ на детали и сборки объектива телескопа. Использованные методы программного комплекса ANSYS были предварительно сопоставлены с численными решениями в программном пакете COMSOL (расчёты ГАИШ). Рассчитаны статические прогибы под действием собственного веса зеркал объектива и самого объектива. Проведён расчёт ряда механических задач, связанных с воздействием на объектив различных внешних факторов: гармонической и случайной вибраций, ударно-импульсных нагрузок. Показано, что разработанная конструкция объектива из карбида кремния удовлетворяет требованиям прочности с необходимыми коэффициентами запаса. Предложена упрощённая математическая модель, результаты расчётов по которой находятся в хорошем/удовлетворительном соответствии с результатами расчётов для реальной математической модели объектива (максимальная погрешность 23 %). Наилучшие результаты по отношению к реальной модели даёт упрощённая модель, в которой приведённые характеристики рассчитывались через относительную плотность облегчённой структуры.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам НПО «Луч» А. А. Соконову и Г. Н. Сохаревой за предоставление для расчётов моделей реальной и упрощённой конструкций объектива телескопа, разработанных ими в SolidWorks, а также С. А. Потанину (ГАИШ МГУ) за предоставление расчётов статической деформации зеркал в COMSOL для предварительной верификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров А. И., Миронов А. В., Прохоров М. Е. и др. Космический эксперимент “Лира-Б”: цели и принципы реализации // *Астрономический журнал*. 2013. **90**, № 3. С. 223–241. DOI: 10.7868/S0004629913030067.
2. Лубков А. А., Попов Ю. А. Современные солнечные телескопы наземного базирования и требования к системам их автоматизации // *Автометрия*. 2019. **55**, № 1. С. 111–128. DOI: 10.15372/AUT20190114.
3. Цуканова Г. И., Бахолдин А. В. Исследование исходных систем ортоскопических астрономических объективов в спектральном диапазоне 0,2–1 мкм // *Оптический журнал*. 2012. **79**, № 5. С. 15–18.
4. Биргер И. А. Круглые пластинки и оболочки вращения. М.: Оборонгиз, 1961. 368 с.
5. Малашко Я. И., Наумов М. Б. Системы формирования мощных лазерных пучков. Основы теории. Методы расчёта. Силовые зеркала. М.: Радиотехника, 2013. 328 с.
6. *Optomechanical Engineering Handbook* /Ed. A. Ahmad. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. 395 p.

Поступила в редакцию 07.05.2019

После доработки 26.07.2019

Принята к публикации 24.08.2019