

УДК 520.2.03

## Метод изготовления и контроля крупногабаритных зеркал для космических телескопов

*А.В. Долгополов, Е.В. Долгополова, Н.В. Стешенко, Я.Н. Черных*

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,  
АР Крым, Украина, 98409  
*dolgop@ukr.net*

Поступила в редакцию 17 октября 2013 г.

**Аннотация.** Описан метод доводки формы поверхности крупногабаритных зеркал для космических телескопов до погрешности  $\lambda/20$  и отработка этого метода на изготовлении ситаллового зеркала диаметром 2.6 м для телескопа ЗТШ.

METHOD OF MAKING AND TESTING LARGE MIRRORS FOR SPACE TELESCOPES, by *A.V. Dolgoplov, E.V. Dolgopolova, N.V. Steshenko, Ya. N. Chernykh*. The paper describes a method for polishing the surface shape of large mirrors for space telescopes to  $\lambda/20$  surface accuracy and testing of this method for the manufacture of 2.6 m diameter sytall mirror for the ZTSH telescope.

**Ключевые слова:** контроль формы оптической поверхности, стенд, разгрузка

---

### 1 Введение

Выведение в космос астрофизической аппаратуры сделало доступным для изучения ультрафиолетовое (УФ) излучение небесных тел. УФ-диапазон электромагнитных волн несет существенную информацию об излучающих телах, поскольку здесь сосредоточена основная часть фотосферного излучения горячих звезд, непрерывного нетеплового излучения высоких энергий и многочисленные спектральные линии высокоионизованных ионов металлов. Таким образом, наблюдения в УФ позволяют получать прямые снимки туманностей в лучах высокоионизованных ионов, исследовать хромосферы и короны звезд, определять химический состав звездных атмосфер вплоть до содержания тяжелых элементов.

УФ-астрофизические наблюдения были начаты в 60-е годы минувшего века и к настоящему времени объем полученных данных огромен: число публикаций составляет многие тысячи, этим исследованиям были посвящены многие конференции и симпозиумы, многочисленные монографии. И, как всегда, в научных исследованиях, чем больше известно, тем интенсивней возникают новые вопросы и новые экспериментальные идеи. Это обстоятельство и стимулирует разработку Всемирной космической УФ-обсерватории.

В разработке проекта Всемирной космической УФ-обсерватории ныне принимают участие астрофизики около десятка стран с различными научными интересами. Учитывая это и обширность имеющихся данных, ниже будут приведены основные достижения УФ-исследований лишь в областях, близких по тематике к работам НИИ “Крымская

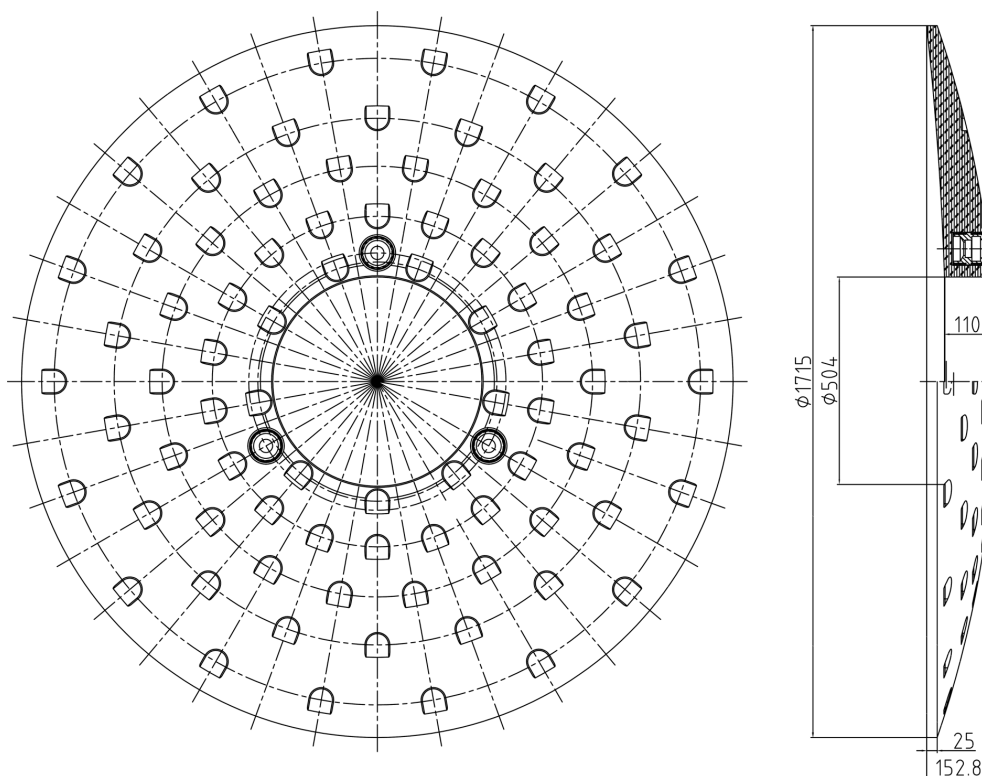
Метод изготовления и контроля крупногабаритных зеркал...

астрофизическая обсерватория”, то есть работы по химическому составу, нестационарности и магнетизму звезд и звездных систем.

Телескоп Т-170М (Боярчук и др., 2008) предназначен для наблюдений в далекой ультрафиолетовой области спектра, что предъявляет повышенные требования к качеству его оптики. При диаметре главного зеркала телескопа 1715 мм его толщина в центре составляет 110 мм, а на краю – лишь 25 мм. В наземных условиях сила тяжести приводит к деформации зеркала, величина которой примерно на три порядка превосходит допустимую ошибку формы его поверхности. Поэтому, чтобы достичь заданной точности формы поверхности главного зеркала при его изготовлении, необходимо применить прецизионную систему разгрузки, способную практически полностью компенсировать силу тяжести.

## 2 Исходные данные и краткое описание технических требований для разработки стенда для обезвешивания тонкого главного зеркала космического телескопа Т-170М диаметром 1.7 м с 81 механизмом опоры

Специалистами НИИ “КрАО” и НПО им. Лавочкина были проведены расчеты с помощью специального пакета программ и выбрано оптимальное соотношение расположения и количества опорных точек разгрузки главного зеркала космического телескопа Т-170М.



**Рис. 1.** Расположение 81-й опорной точки разгрузки главного зеркала телескопа Т-170М диаметром 1.7 м

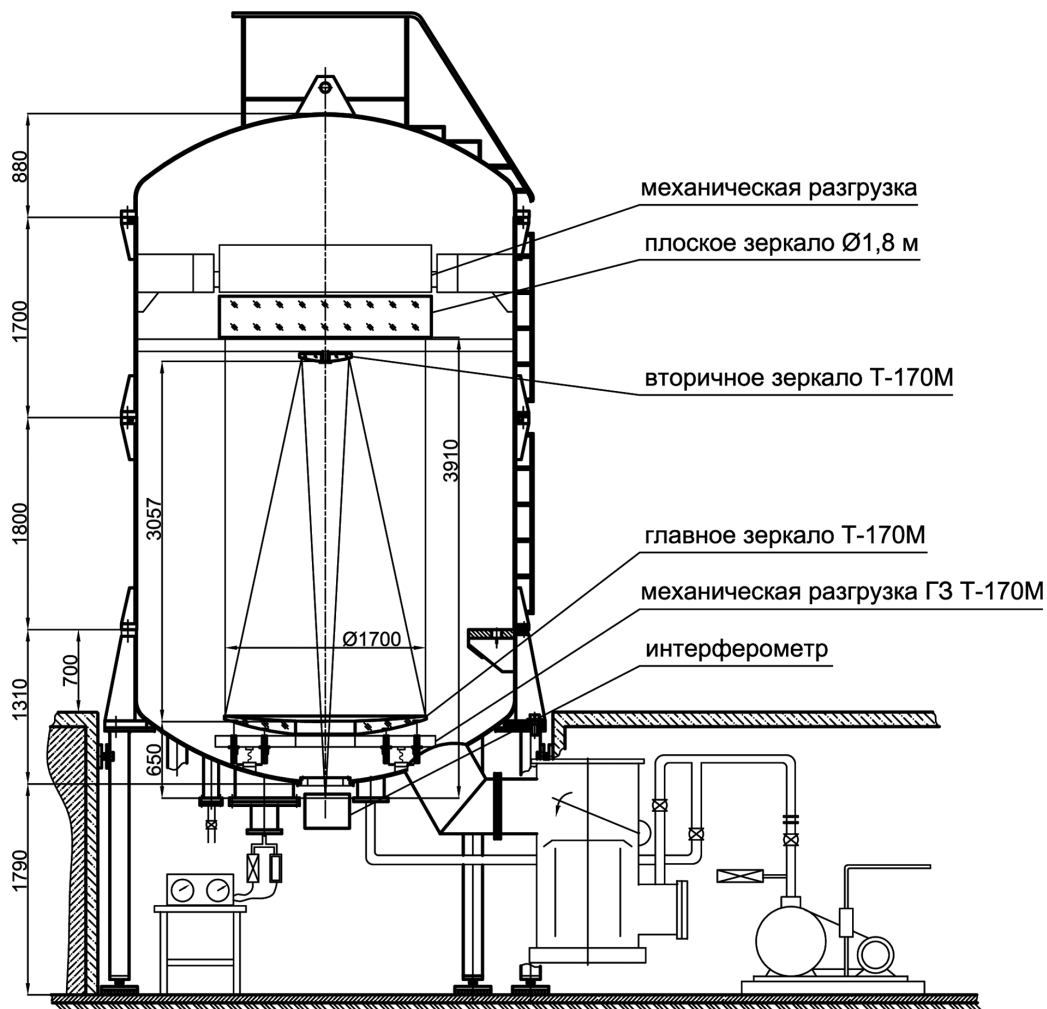
Опорные точки разгрузки (рис. 1) равномерно распределены на пяти диаметрах (табл. 1).

Исходя из расчетов, для обеспечения необходимой точности оптической поверхности  $\lambda/20$  главного зеркала телескопа Т-170М, необходимо обеспечить усилие 4.5 кг на каждой из 81-й опорной точке разгрузки с погрешностью до 30 грамм.

Таблица 1.

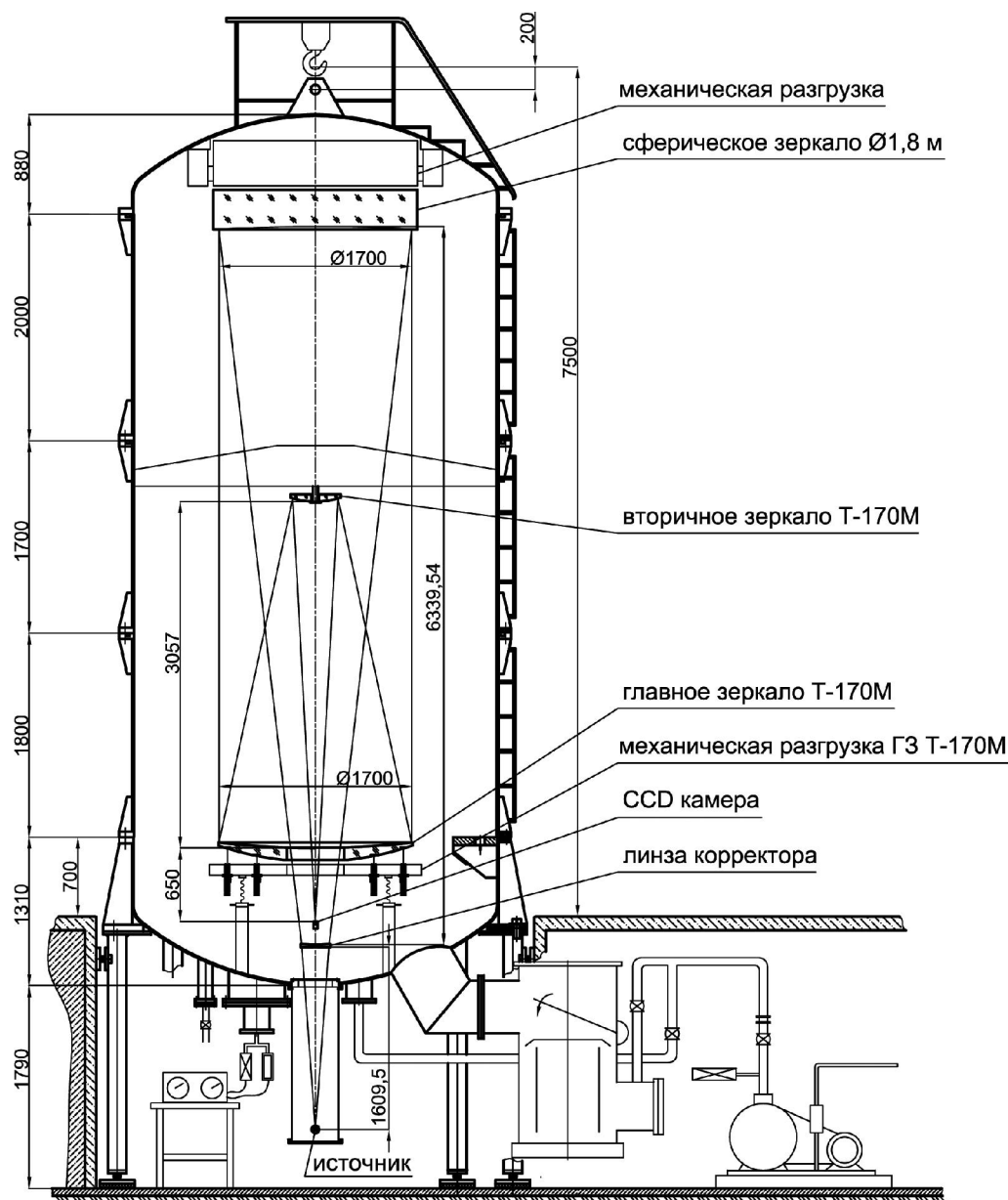
Диаметр, мм	1559	1267.6	1036	794	573.4
Угловой шаг, град.	20	20	20	20	40
Количество опорных точек, шт.	18	18	18	18	9

Для контроля оптической системы телескопа Т-170М были разработаны две схемы (рис. 2 и 3) с целью исключения случайных ошибок (известный случай с космическим телескопом Хаббл), а также увеличения точности и достоверности результатов аттестации.



**Рис. 2.** Схема контроля оптической системы телескопа Т-170М Ø1.7 м в вакуумной камере Ø3.2 м с плоским зеркалом Ø1.8 м

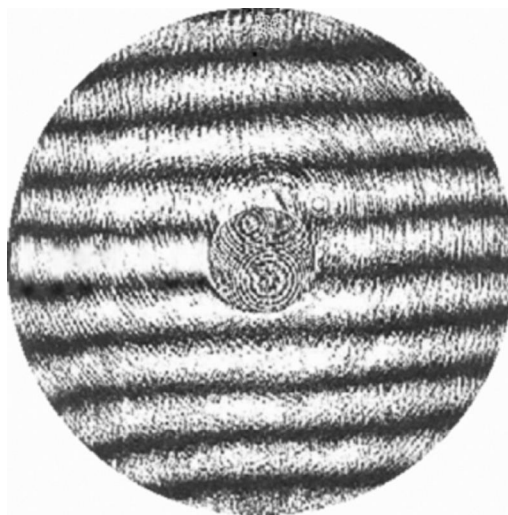
На рис. 2 представлена вертикальная автоколлимационная схема контроля оптической системы телескопа Т-170М Ø1.7 м в вакуумной камере Ø3.2 м с плоским зеркалом Ø1.8 м. Плоское ситалловое зеркало толщиной 300 мм смонтировано на своей системе разгрузки. Все зеркала имеют юстировочные подвижки, выведенные из вакуумной камеры. В схеме контроля используется лазерный неравноплечий интерферометр, позволяющий использовать в качестве источников излучения как He-Ne лазер с длиной волны 0.6328 мкм, так и источник УФ-диапазона.



**Рис. 3.** Схема контроля оптической системы телескопа Т-170М Ø1.7 м в вакуумной камере Ø3.2 м со сферическим зеркалом Ø1.8 м

На рис. 3 представлена дублирующая схема контроля оптической системы телескопа Т-170М, где плоское зеркало Ø1.8 м заменено на сферическое. Источник излучения размещен в фокусе сферического зеркала и снабжен простой кварцевой линзой для коррекции сферической аберрации, таким образом, мы получаем схему с полноразмерным коллиматором. Сферическое зеркало изготовлено в НИИ «КрАО», его интерферограмма показана на рис. 4.

Тестирование оптики телескопа Т-170М будет выполняться в вакуумной камере, что исключает вредное воздействие температурных неоднородностей воздуха. Поэтому крайне важно обеспечить корректную работу механизмов разгрузки в условиях вакуума. Это относится и к выбору материалов деталей разгрузки, и к типу конструкции системы разгрузки.



**Рис. 4.** Интерферограмма контрольного сферического зеркала диаметром 1.8 м и радиусом кривизны 14 м

Например, нельзя использовать узлы с жидкой или консистентной смазкой, так как в вакууме смазка испаряется и осаждается на оптических деталях. В этой связи в конструкции разгрузки можно применять узлы только с “сухим” трением. По этой причине желательно минимизировать количество узлов трения, чтобы достичь требуемой точности работы разгрузки. Тип конструкции системы разгрузки был выбран механический, так как разгрузка такого типа работает одинаково корректно и в вакууме, и на воздухе.

Предыдущий опыт работы с разгрузкой на 54 дискретные опоры главного зеркала телескопа Т-170 диаметром 1.7 м и толщиной 100 мм показал, что рычажная система разгрузочных узлов с противовесом работает достаточно эффективно и корректно. Однако узлы разгрузки недостаточно компактны, что не позволяет их применить для обезвешивания тонкого главного зеркала космического телескопа Т-170М диаметром 1.7 м с 81 механизмом опоры.

Учитывая вышесказанное, была разработана совершенно новая конструкция разгрузочного узла, которая лишена недостатков предыдущей системы и имеет свои неоспоримые преимущества.

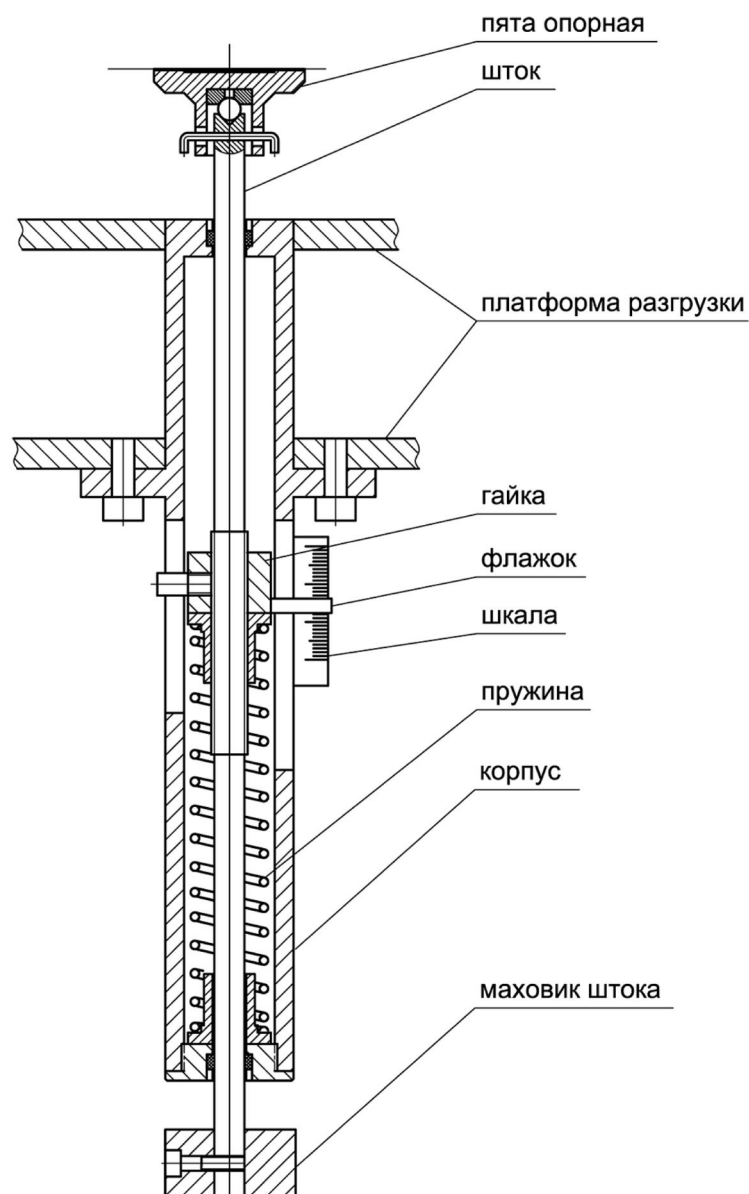
Узел механической разгрузки главного зеркала телескопа Т-170М с пружиной сжатия (рис. 5) компактен и имеет небольшой вес. Нагрузочная способность пружины сжатия имеет линейную характеристику и позволяет производить калибровку каждого узла системы разгрузки отдельно с нужной точностью. Пружина рассчитывалась так, что усилие в 30 г изменяет длину пружины на 1 мм (Анурьев, 1978). Конструкция узла разгрузки позволяет производить точную настройку с маркировкой положения флажка на шкале.

В данной конструкции количество узлов трения сведено к минимуму, что в свою очередь позволяет достичь максимально возможной точности разгрузки зеркала. Кроме того, в системе разгрузки предусмотрен вибратор, предназначенный для минимизации влияния сил трения покоя на погрешность работы разгрузочных узлов.

### 3 Методика регулировки узла разгрузки

Методика регулировки узла разгрузки достаточно проста и не требует сложных приспособлений.

Груз с расчетным весом 4.5 кг помещается на опорную пятю узла разгрузки. Посадочное место груза должно иметь расчетное расстояние от плоскости платформы разгрузки до плоскости опорной пятю.



**Рис. 5.** Узел механической разгрузки главного зеркала телескопа Т-170М диаметром 1.7 м

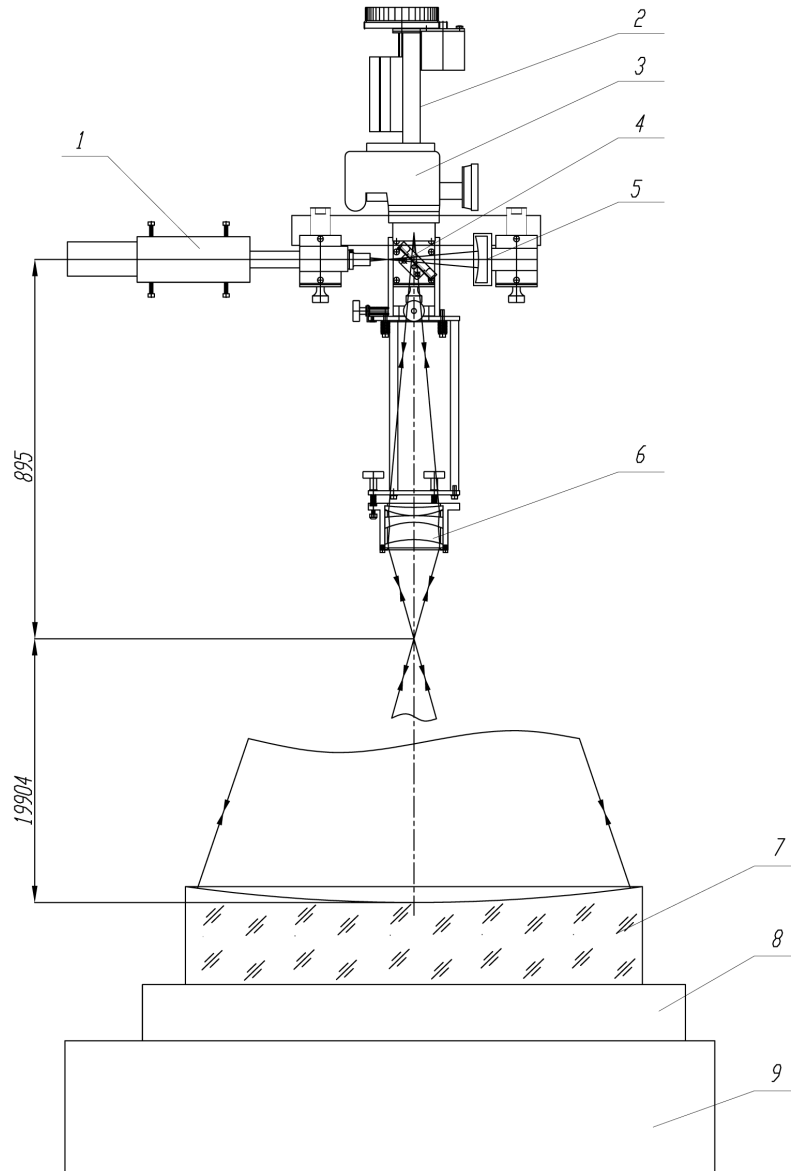
Далее, вращая маховик штока, мы тем самым меняем положение опорной пяты относительно плоскости платформы разгрузки и добиваемся касания груза плоскости платформы на три опорных точки, расположенных на грузе.

Затягиваем винт в направляющей прорези корпуса, фиксируя гайку со штоком.

Маркируем положение флажка на шкале. Это положение флажка соответствует расчетному усилию в каждой точке разгрузки и в дальнейшем позволяет контролировать корректность работы всех узлов системы разгрузки.

Такую процедуру необходимо повторить для каждого узла разгрузки, меняя только расчетное расстояние от плоскости платформы разгрузки до трех опорных точек, расположенных на грузе для каждого из пяти радиусов расположения точек разгрузки.

#### 4 Стенд для доводки формы поверхности зеркала диаметром 2.6 м для зеркального телескопа им. Г.А. Шайна (ЗТШ) НИИ “КрАО”



**Рис. 6.** Стенд для доводки формы поверхности крупногабаритного высокоточного зеркала диаметром 2.6 м для телескопа ЗТШ.

1. Газовый He-Ne лазер  $\lambda = 632.8$  нм. 2. Автоматизированные направляющие интерферометра, оснащенные шаговыми двигателями. 3. Приемник изображений с ПЗС-матрицей. 4. Светоделительная пластина. 5. Эталонное зеркало. 6. Трехлинзовый юстируемый компенсатор. 7. Зеркало ЗТШ диаметром 2600 мм, толщиной 380 мм и радиусом кривизны поверхности 19904 мм. 8. Планшайба станка диаметром 3000 мм. 9. Станок ШП-3000

Для доводки формы поверхности крупногабаритного высокоточного зеркала для ЗТШ диаметром 2.6 м и радиусом кривизны около 20 м создан специальный стенд высотой 21 метр (рис. 6). Изготовлена и укомплектована система оптического контроля качества зеркала. В состав системы входят: неравноплечий лазерный интерферометр, оборудованный приемником

Метод изготовления и контроля крупногабаритных зеркал...

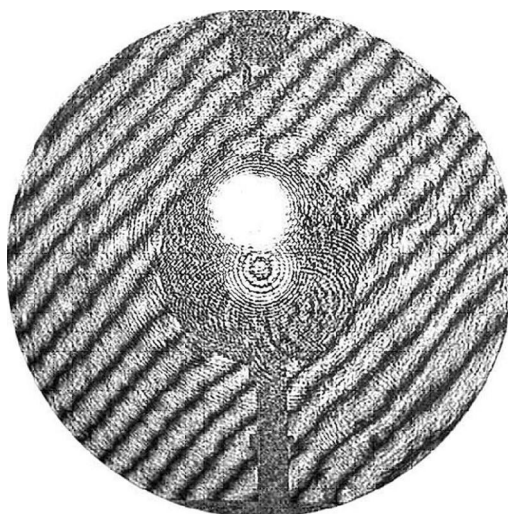
изображений с ПЗС-матрицей; однолинзовый и трехлинзовый юстируемый компенсатор; персональный компьютер с видеомонитором, а также рабочее место наблюдателя, которое располагается на высоте 21 метр над поверхностью зеркала; компьютерное и программное обеспечение.

Как известно, при контроле длиннофокусных оптических систем в воздухе даже в закрытых помещениях всегда существует проблема теплового движения воздуха, искажающего интерференционную картину настолько, что делает невозможным окончательный контроль зеркала таким способом. С целью минимизации влияния тепловых потоков воздуха предусмотрена система защиты оптического тракта от перемещений воздуха в момент контроля оптической поверхности на планшайбе станка. В качестве такой системы используется полиэтиленовый рукав диаметром 3 м и длиной более 20 м, который поднимается в контрольную башню над станком для доводки зеркала полировальником и опускается при проведении операций контроля оптической поверхности.

Для подъема/опускания защитного рукава спроектирована и изготовлена система из легких металлопластиковых кольцевых труб, соединенных тросами. Приводится в движение эта система с помощью специального подъемного механизма, находящегося в контрольной башне над планшайбой станка.

Неравноплечий лазерный интерферометр спроектирован для контроля в вертикальной схеме, когда контролируемое зеркало находится на планшайбе станка под интерферометром. Поэтому все узлы интерферометра спроектированы так, чтобы в момент работы над контролируемым зеркалом исключить падение каких-либо деталей.

В конструкции интерферометра применен стабилизированный газовый He-Ne лазер ( $\lambda = 632.8$  нм) с большой длиной когерентности, что в свою очередь позволяет получать контрастную интерференционную картину с четкой системой интерференционных полос. С помощью системы линз и микрообъектива в интерферометре формируется точечный источник света. Далее свет попадает на светоделительную пластину, часть его отклоняется на контролируемое зеркало, а часть проходит на эталонное зеркало. Отраженное от зеркал излучение собирается в центрах кривизны зеркал. При совмещении этих изображений формируется интерференционная картина.



**Рис. 7.** Интерферограмма (при двойном прохождении света через систему) двухзеркальной оптической системы Кассегрена с асферическим и главным вторичным зеркалами диаметром 800 мм и 250 мм. Среднеквадратическая ошибка волнового фронта системы  $0.032 \lambda$  для  $\lambda = 632.8$  нм

В схеме контроля параболического зеркала телескопа ЗТШ решено задействовать два линзовых компенсатора, которые позволяют использовать референтный волновой фронт от



точного сферического зеркала. Первый – однолинзовый компенсатор – предназначен для контроля формы поверхности зеркала на начальном этапе его полировки. Второй – трехлинзовый компенсатор, описанный В.Ю. Теребижом в статье “Автоколлимационный компенсатор для контроля асферических поверхностей. I” (Теребиж, 2014). Трехлинзовый компенсатор позволяет сначала провести независимую проверку качества изготовления и сборки его элементов, а затем установить компенсатор в схеме контроля с должной точностью при помощи оптических методов.

Линзы компенсатора изготовлены и протестированы в оптической мастерской НИИ “КрАО”. Оправа с системой подвижек для точной установки компенсатора была изготовлена в механической мастерской НИИ “КрАО”.

Изготовление и контроль оптических асферических поверхностей зеркал требует разработки определенной методики, которая существенно сложнее по сравнению с изготовлением оптических сферических поверхностей. В свою очередь, изготовление крупногабаритных высокоточных зеркал накладывает свои требования на технологический процесс. В оптической мастерской НИИ “КрАО” накоплен значительный опыт по изготовлению крупногабаритных высокоточных зеркал. В частности, изготовлено несколько двухзеркальных систем с асферическими главными зеркалами диаметром 800 мм (рис. 7) для наземных телескопов и оптическая система диаметром 800 мм для космического УФ-телескопа “Астрон”, успешно работавшего в космосе с 1983 г. более шести лет.

## 5 Выводы

Разработан узел механической разгрузки главного зеркала космического телескопа Т-170М диаметром 1.7 м с пружиной сжатия, который позволяет проводить тестирование оптики телескопа Т-170М как в вакуумной камере, так и на воздухе.

Расчетные данные показывают, что описанный узел позволит обеспечить контроль оптической поверхности тонкого главного зеркала телескопа Т-170М в наземных условиях в вакуумной камере с погрешностью  $\lambda/20$  при  $\lambda = 0.63$  мкм.

Разработана методика доводки формы поверхности крупногабаритных высокоточных асферических зеркал до точности поверхности  $\lambda/20$ .

Разработан и изготовлен специальный стенд для доводки формы поверхности крупногабаритного высокоточного асферического зеркала диаметром 2.6 м для ЗТШ.

## Литература

Анурьев В.И. // Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. Т. 3. М.: Машиностроение. 1978.

Боярчук А.А. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. № 1. С. 229.

Теребиж В.Ю. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2014. Т. 110. № 1. (в печати).