

УДК 520.2, 520.16

## Компенсация аберраций зеркал космических телескопов изгибом

*Д.Н. Рачковский<sup>1</sup>, Н.В. Стешенко<sup>1</sup>, А.А. Боярчук<sup>2</sup>, М.Ф. Ильясов<sup>3</sup>, А.А. Мошнев<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория", 98409, Украина, Крым, Научный

<sup>2</sup> Институт астрономии (ИНАСАН), 119017, Россия, Москва, ул. Пятницкая, 48

<sup>3</sup> ФГУП "Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина", 141400, Россия, Московская обл., г. Химки, Ленинградское шоссе, д. 24

Поступила в редакцию

**Аннотация.** Приводятся результаты испытаний на изгиб технологического зеркала телескопа Т-170. Изгиб зеркала производился с помощью 36 толкателей расположенных на двух концентрических окружностях. Нагрузка на толкателях обеспечивала возникновение на зеркале оптических аберраций 3-го порядка с амплитудой около 0.6 мкм. Показано, что сферическая аберрация, кома, астигматизм и треугольная кома могут быть сгенерированы по отдельности, т.е. практически чистыми. Установлена связь между величиной усилий на толкателях и амплитудой и фазой возникающих аберраций. Обнаружено, что амплитуда возникающих аберраций в 1.5 раза больше ее теоретического значения, тогда как фазы совпадают. Видимо это объясняется неточностью знания модуля упругости материала зеркала. Проведен эксперимент компенсации аберраций зеркала телескопа Т-170. С помощью рассчитанных усилий на управляющих кольцах толкателей удалось практически удалить значительные аберрации астигматизма и треугольной комы зеркала.

SCHMIDT-LIKE SPHERICAL ABERRATION CORRECTOR, *by Steshenko N.V.* The effects of bending tests of a technological mirror of a telescope T-170 are resulted. The bending of a mirror was made with the help 36 actuators located on two concentric circles. The load on actuators provided occurrence on a mirror of optical aberration 3-rd with amplitude about 0.6 microns. Is shown, that a spherical aberration, coma, astigmatism and triangular coma can be generated separately. The connection between value of efforts on actuators both amplitude and phase of arising aberrations is established. It is revealed, that the amplitude of arising aberrations in 1.5 times is more than its theoretical value, whereas the phases coincide. Probably it is explained by inaccuracy of knowledge of an elastic modulus of a material of a mirror. The experiment of compensation of aberrations of a mirror of a telescope T-170 is carried out. With the help of the designed efforts on control rings of actuators it was possible practically to remove considerable aberrations of an astigmatism and triangular coma of a mirror.

**Ключевые слова:** телескопы, аберрация, компенсация, изгиб

---

### 1 Постановка проблемы и метод ее решения

Несомненно, что большая часть астрономических наблюдений в ближайшем будущем будет производиться с помощью космических телескопов. Качество изображения, создаваемое оптикой

телескопа на орбите, может изменяться из-за влияния невесомости и градиентов температуры, возможны и ошибки контроля оптики в цеховых условиях. Поучительным примером является телескоп им. Хаббла (HST) (Барроуз, 1991) главное зеркало которого, при испытаниях на орбите имело значительную сферическую абберацию (ошибка волнового фронта  $RMS = -0.41\lambda$  ( $\lambda = 633$ ). Поскольку главное зеркало телескопа им. Хаббла не было рассчитано на компенсацию столь значительной абберации посредством его деформации на орбите, потребовалась разработка дорогостоящей коррекционной оптики и ее установка на телескоп в космосе. Для телескопа T-170 выходом в аналогичной ситуации может служить применение активного главного зеркала, т.е. тонкого зеркала, фигура которого может изменяться по командам с Земли, улучшая качество изображения в телескопе. Эта концепция и будет воплощена в телескопе T-170.

Проект создания космического телескопа для наблюдения небесных объектов в ультрафиолетовом диапазоне спектра предусматривает исправление аббераций главного зеркала изгибом его с помощью двух поясов толкателей. Вдоль каждого из поясов размещаются с равным интервалом 18 толкателей (рис. 1). Максимальное усилие на каждом из толкателей может достигать 3кг. Это, как показывают расчеты, может обеспечить исправление аббераций 3-го порядка с амплитудой в  $1\lambda$ .

В марте 2001 г. в Крымской Астрофизической Обсерватории (КрАО) проводились стендовые испытания изгиба технологического зеркала телескопа T-170. Для имитации невесомости зеркало располагалось на пневматических мешках. Величина давления в мешках подбиралась из условия минимума аббераций, обусловленных силой тяжести. Конструктивно толкатели представляли собой рычажные весы с некоторым набором гирь. Минимальный вес гири равнялся 0.5 кг.

В математическую основу испытаний был положен принцип создания чистых аббераций третьего порядка: сферической абберации, комы, астигматизма и треугольной комы. Поскольку, если будет известна зависимость амплитуды и фазы абберации от распределения усилий на двух поясах толкателей, то усилия с противоположным знаком будут компенсировать соответствующие абберации. Аналогичный математический подход к проблеме компенсации дефектов поверхности зеркала описан в (Швезингер, 1988; Ноэт, 1988) при разработке конструкции 3.5-метрового телескопа (NTT) Европейской Южной Обсерватории (ESO).

Реакция зеркала оценивалась нами интерферометрическим методом. Для этого в КрАО был создан специальный стенд для интерферометрического контроля формы поверхности зеркала (рис.2). Рабочее место наблюдателя располагалось на высоте 9 м над поверхностью зеркала. В состав системы входили неравновесный лазерный интерферометр и цифровая фотокамера в качестве приемника изображений.

Для обработки полученных интерферограмм была создана специальная программа. Поскольку на зеркале имелся значительный остаточный астигматизм порядка  $0.6\lambda$ , интерференционная картина в ряде случаев была довольно сложной. Поэтому оцифровка полос производилась на экране компьютера вручную. Поверхность изогнутого зеркала представлялась разложением в ряд по ортогональным полиномам Цернике (Нолл, 1976). Полиномы Цернике удобны, поскольку ряд полиномов математически описывает абберации третьего и более высоких порядков. Ортогональность полиномов в круге обеспечивает независимость вычисляемых аббераций. В таблице 1 приведены математические выражения ряда полиномов Цернике и названия соответствующих аббераций. Теперь перейдем к описанию проведенных экспериментов.

## 2 Сферическая абберация

Изгиб зеркала для модулирования сферической абберации производился приложением усилий одинаковых по величине, но противоположных по знаку, на управляющих кольцах толкателей. При этом, естественно, обеспечивается реакция опор, равная нулю. Нагрузки последовательно принимались равными 1кг, 2кг и 3кг, а затем знаки усилий менялись на обратные. Нашей задачей являлось выяснение зависимости от величины нагрузки спектрального состава возникающей абберации, построения профиля зеркала и сравнения соответствующих величин

Таблица 1.

$Z_4 = 2r^2 - 1$	$Z_2 = r \cos \Theta$	$Z_5 = r^2 \sin 2\Theta$	$Z_9 = r^3 \sin 3\Theta$
	$Z_3 = r \sin \Theta$	$Z_6 = r^2 \cos 2\Theta$	$Z_{10} = r^3 \cos 3\Theta$
Фокусировка	Наклон волнового фронта	Астигматизм	Треугольная кома
$Z_{11} = 6r^4 - 6r^2 + 1$	$R_7 = 3r^3 - 1$	$R_{12} = 4r^4 - 3r^2$	$R_{18} = 5r^5 - 4r^3$
	$Z_7 = R_7 \sin \Theta$	$Z_{12} = R_{12} \cos 2\Theta$	$Z_{18} = R_{18} \cos 3\Theta$
	$Z_8 = R_7 \cos \Theta$	$Z_{13} = R_{12} \sin 2\Theta$	$Z_{19} = R_{18} \sin 3\Theta$
Сферическая aberrация	Кома		
$Z_{22} = 20r^6 - 30r^2 - 1$	$R_{16} = (10r^5 - 12r^3 + 3r)$		
	$Z_{16} = R_{16} \cos \Theta$		
	$Z_{17} = R_{16} \sin \Theta$		

с теоретическими расчетами. При расчете сферической aberrации возникает следующая трудность. Интерферометрический метод контроля поверхности не дает амплитуды полинома соответствующего фокусировке (таблица 1). Амплитуду полинома приходится оценивать при помощи специальных измерений и некоторых выкладок. Уравнение сечения поверхности зеркала вдоль радиуса на основании теоретических расчетов имеет вид:

$$F(\rho) = \{0.510 + 0.427Z_4(\rho) - 0.0595Z_{11}(\rho) + 0.0129Z_{22}(\rho)\}P. \quad (1)$$

Здесь  $P$  – величина приложенного усилия в кг на отдельном толкателе,  $\rho$  – расстояние от центра зеркала в единицах полного радиуса зеркала,  $Z_4(\rho)$ ,  $Z_{11}(\rho)$ ,  $Z_{22}(\rho)$  – полиномы Цернике. Значения полиномов при  $\rho = 1$  равны единице, поэтому, если мы каким либо способом находим амплитуду определенного полинома, то эта величина равна отклонению поверхности зеркала на краю от нулевого уровня. Как видим из уравнения (1), ожидаемая точность измерения амплитуды полинома  $Z_{11}(\rho)$  в семь раз меньше, чем точность измерения амплитуды  $Z_4(\rho)$ . Соответствующий график зависимости амплитуды полинома  $Z_{11}(\rho)$  от величины приложенного усилия мы не приводим, поскольку он показывает очень большой разброс данных.

Для оценки величины вклада фокусировки мы проделали отдельный эксперимент. Был получен ряд интерферограмм разгруженного зеркала при максимально возможных пределах настройки интерферометра. При этом фиксировались показания нониуса интерферометра. Из обработки результатов следует, что зависимость между амплитудой при  $Z_4(\rho)$  и показаниями нониуса можно выразить в виде соотношения:

$$b = c + 3.01t, \quad (2)$$

где  $t$  – показания нониуса интерферометра,  $c$  – некоторая неизвестная константа,  $b$  – вклад в амплитуду при полиноме  $Z_4(\rho)$ , возникающий при настройке интерферометра. Выведем теперь уравнение, определяющее смещение поверхности зеркала под действием симметричной нагрузки в  $P$  кг на отдельном толкателе. Уравнение можно записать в виде:

$$F_P(\rho) = a_P + b_P Z_4(\rho) + c_P Z_{11}(\rho) + d_P(\rho). \quad (3)$$

Уравнение поверхности ненагруженного зеркала, учитывающее как собственную кривизну зеркала так и aberrации, которое мы получаем после обработки интерферограмм, можно записать в виде:

$$F_{0,i}(\rho, \Theta) = a_0 + a_i + (b_0 + b_i)Z_4(\rho) + c_0 Z_{11}(\rho) + d_0 Z_{22}(\rho) + \Sigma f(\rho, \Theta). \quad (4)$$

В (4) индекс  $i$  означает конкретную настройку интерферометра. Уравнение, описывающее поверхность нагруженного зеркала, будет иметь вид:

$$F_{P,j}(\rho, \Theta) = (a_0 + a_j + a_P) + (b_0 + b_j + b_P)Z_4(\rho) + (c_0 + c_P)Z_{11}(\rho) + (d_0 + d_P)Z_{22}(\rho) + \Sigma f(\rho, \Theta). \quad (5)$$

Вычитая уравнение (4) из (5) находим:

$$F_{P,j}(\rho, \Theta) - F_{0,i}(\rho, \Theta) = a_j - a_i + a_P + (b_j - b_i + b_P)Z_4(\rho) + c_P Z_{11}(\rho) + Z_{22}(\rho).$$

Учитывая (2), а также, что  $a_j = a_i$ , находим:

$$F_{P,j}(\rho, \Theta) - F_{0,i}(\rho, \Theta) = a_P + (b_P + 3.01(t_j - t_i))Z_4(\rho) + c_P Z_{11}(\rho) + d_P Z_{22}(\rho) \quad (6)$$

Из обработки интерферограмм мы знаем величины  $c_P$ ,  $d_P$ , а также величину выражения:

$$b = c + 3.01(t_i - t_j). \quad (7)$$

Поскольку теоретический аналог уравнения (3) есть (1) и, как показывают расчеты, представляет почти прямую линию можно положить:

$$a_P = aP. \quad (8)$$

Таким образом, смещение поверхности зеркала под действием нагрузки  $P$  может быть записано:

$$F_P(\rho) = aP + (b - 3.01(t_j - t_i))Z_4(\rho) + c_P Z_{11}(\rho) + d_P Z_{22}(\rho). \quad (9)$$

Коэффициент  $a$  можно найти из условия, что все кривые (9) должны пересекаться в точке закрепления зеркала, т.е. при  $\rho = 0.384$ . Как оказалось:

$$a = 0.75. \quad (10)$$

Интересно отметить, что полученное значение  $a$  в 1.5 раза больше теоретического, которое мы находим из уравнения (1) Из рис. 3 видно, что теоретически рассчитанное (но умноженное на 1.5) отклонение поверхности зеркала под действием нагрузки хорошо совпадает с измеренным отклонением. Таким образом, можно сделать вывод, что изгиб зеркала при модуляции сферической аберрации в 1.5 раза больше, чем теоретически рассчитанный. Аналогичный вывод, как мы покажем в дальнейшем, подтверждается при модуляции других аберраций.

### 3 Аберрация кома

Как показывают теоретические расчеты, чистую, без примесей других аберраций, кому можно смоделировать на поверхности зеркала при выполнении условия равенства нулю моментов усилий приложенных к управляющим кольцам относительно точек опоры зеркала. Зависимость усилий от позиционного угла  $\Theta$  должна быть пропорциональна  $\cos(\Theta + \phi)$ . Здесь  $\phi$  – некоторая постоянная фаза. Если моменты усилий в точках опор не равны нулю, в спектре разложения уравнения поверхности по полиномам Цернике будут присутствовать члены, соответствующие астигматизму. Вследствие определенных технических трудностей, величины усилий имели дискретность в 0.5 кг. Хотя распределение усилий по толкателям несколько отличалось от зависимости  $\cos(\Theta + \phi)$ , вклад астигматизма в формулу разложения был несущественен. Максимальное усилие на толкателях принималось равным  $\pm 1.5$ ,  $\pm 2.0$ ,  $\pm 3.0$ . При этом амплитуда усилий на внутреннем поясе была больше в 1.65 раза. Теоретическое уравнение сечения в фазе максимума комы при максимальной нагрузке на внешнем поясе толкателей в Зкг записывается:

$$Z(\rho, \Theta) = [1.121\rho + 0.529Z_7(\rho) - 0.218Z_{17}(\rho) + 0.075Z_{29}(\rho)]\cos(\Theta + \phi). \quad (11)$$

Чтобы получить соответствующее уравнение на основе реальных измерений, мы как и в случае других аберраций, из спектра амплитуд соответствующего нагруженному зеркалу, вычитаем

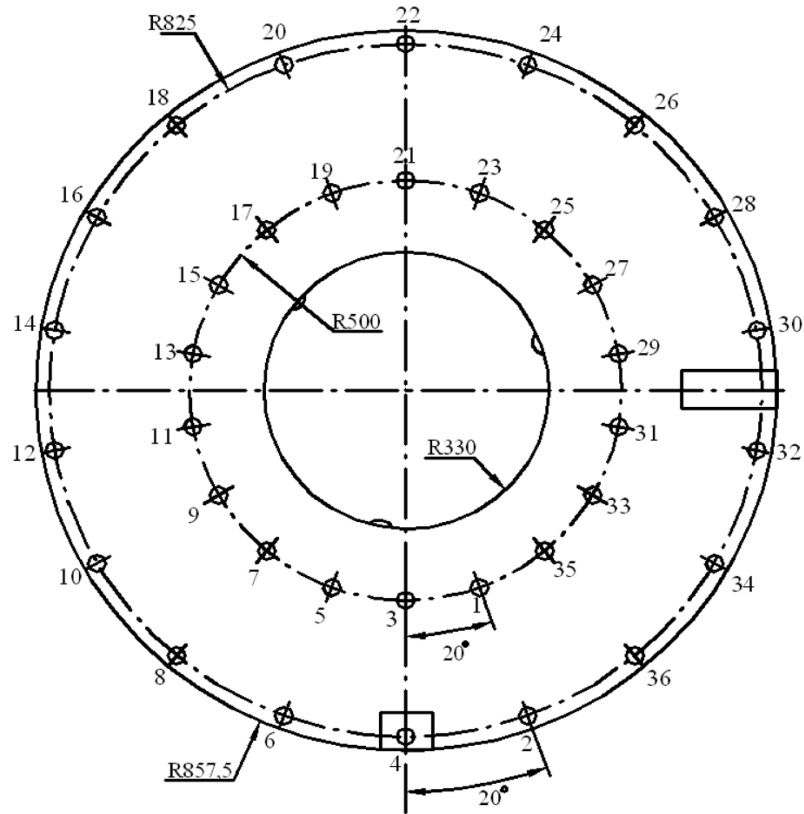


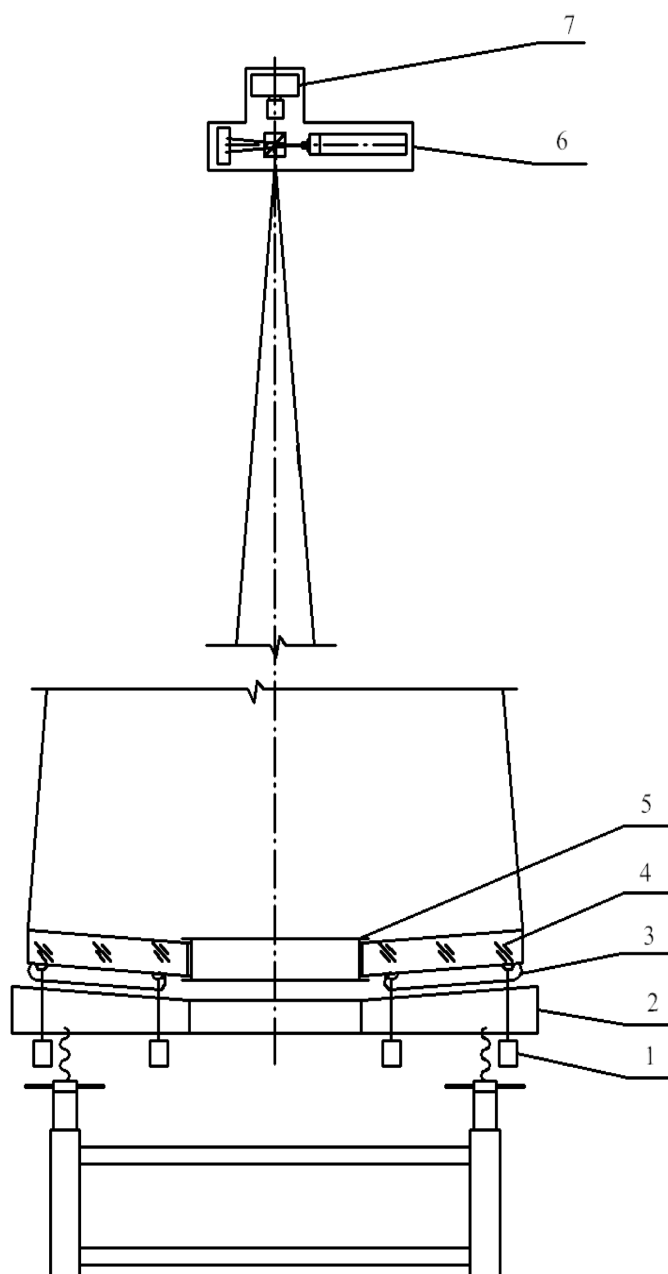
Рис. 1. Схема расположения толкателей на поверхности главного зеркала телескопа Т-170.

спектр амплитуд разгруженного зеркала. Однако, при этом коэффициент при  $\rho$  определяется неуверенно. Поскольку между наблюдаемым и теоретическим сечением, в случае других aberrаций выполнялось соотношение:

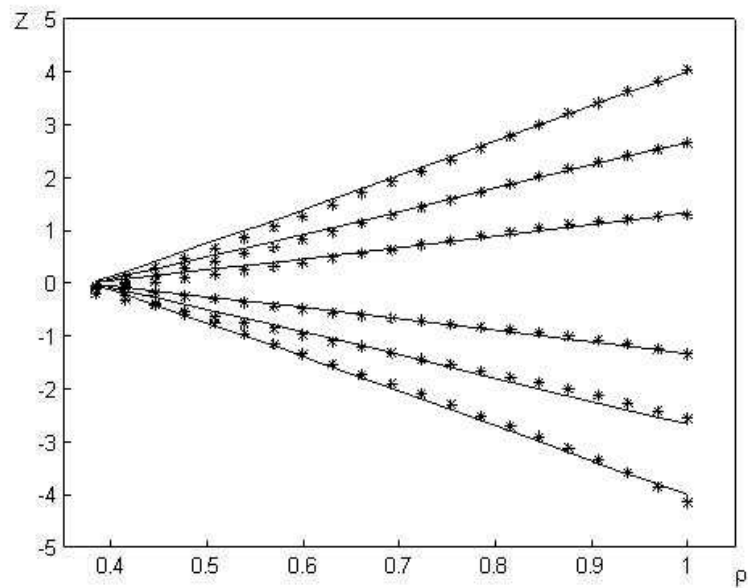
$$Z(\rho, \theta)_O = Z(\rho, \theta)_T * 1.5,$$

то при вычислении  $Z(\rho, \theta)_O$  коэффициент при  $\rho$ , согласно уравнению (11) был принят  $1.121 * 1.5 = 1.68$

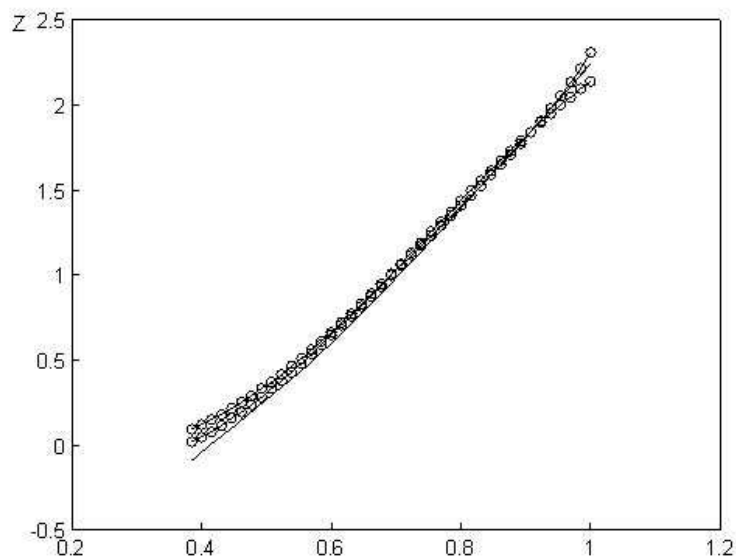
На рис. 4 приведен теоретически рассчитанный изгиб поверхности, умноженный на коэффициент 1.5 (сплошная кривая) и рассчитанный на основании интерферограмм. Таким образом, очевидно, что теоретически рассчитанные отклонения поверхности при модуляции комы в 1.5 раза меньше реальных также как и в случае модуляции сферической aberrации. Теоретически рассчитанное и измеренное значение фазы модулируемой комы на зеркале совпадают с точностью  $\pm 5^\circ$ . Возможно, при выполнении более точной гармонической зависимости приложенных усилий от угла  $\theta$  можно добиться более точного предсказания фазы генерируемой aberrации.



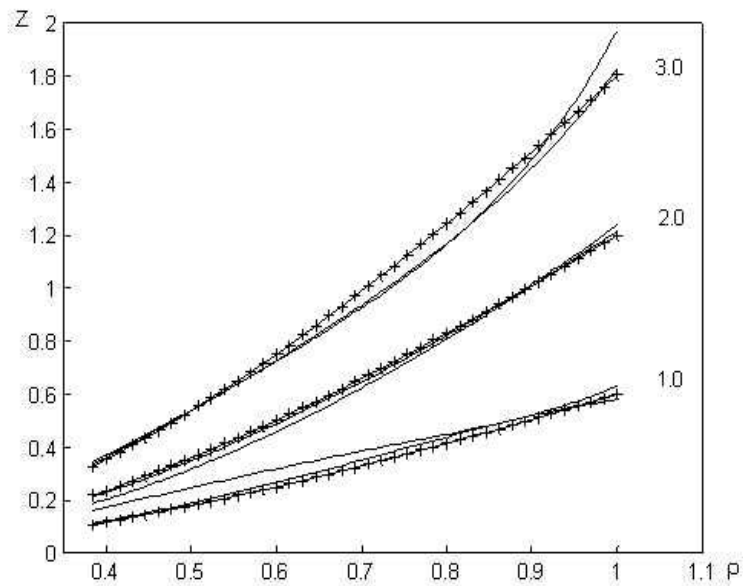
**Рис. 2.** Специальный стенд интерферометрического контроля формы поверхности зеркала. 1 - приводы коррекции, 2 - основание платформы, 3 - мешки пневморазгрузки, 4 - главное зеркало, 5 - оправа зеркала, 6 - лазерный интерферометр, 7 - цифровая фотокамера.



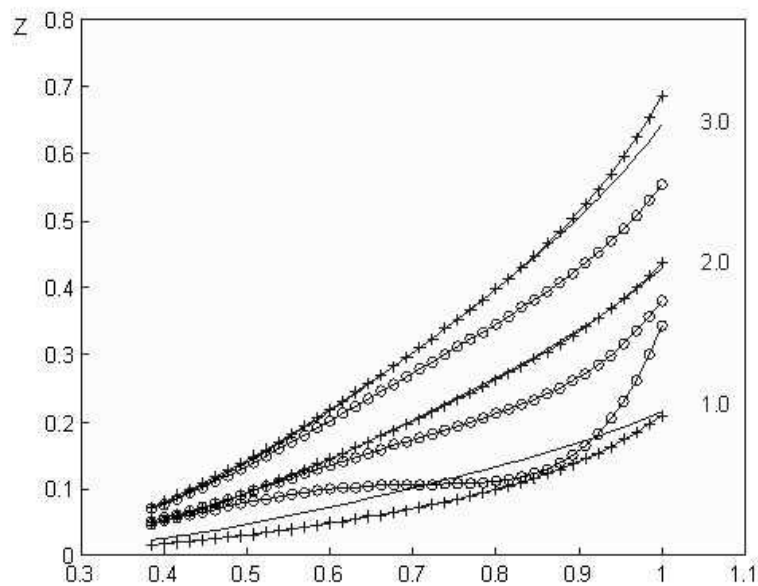
**Рис. 3.** Сравнение теоретических и наблюдаемых значений отклонения поверхности зеркала при модуляции сферической aberrации. Отдельные лучи соответствуют нагрузкам на толкателях в  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$  кг. Сплошные прямые – теоретические значения, умноженные на коэффициент 1.5. Помеченные точки – экспериментальные. По оси абсцисс отложены значения относительных радиусов точки  $\rho$ . По оси ординат отложены отклонения поверхности зеркала, выраженные в единицах длины волны интерферометра.



**Рис. 4.** Сравнение теоретических и наблюдаемых значений отклонения поверхности зеркала под действием нагрузок при модуляции комы. Сечение поверхности дается в фазе максимума комы. Сплошная линия соответствует теоретическому значению, умноженному на коэффициент 1.5. Помеченные линии соответствуют двум вариантам знаков нагрузок.

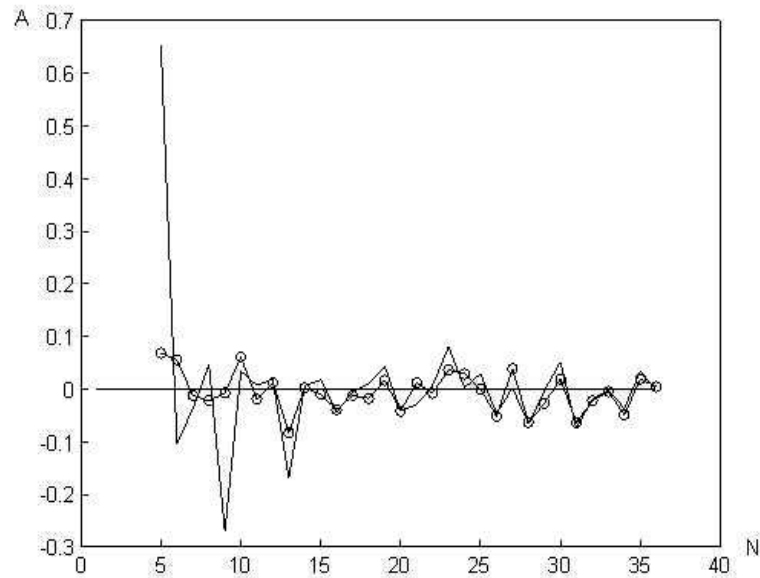


**Рис. 5.** Сравнение теоретически рассчитанного и измеренного смещения поверхности зеркала при модуляции астигматизма. Теоретические значения умножены на коэффициент 1.5. Измерения и расчеты приведены для фазы максимума астигматизма. Помеченная кривая соответствует теоретическим расчетам. Непомеченные кривые – данные эксперимента, отличающиеся знаком нагрузок. Цифры 1, 2, 3 – величины в кг нагрузок на толкателях.

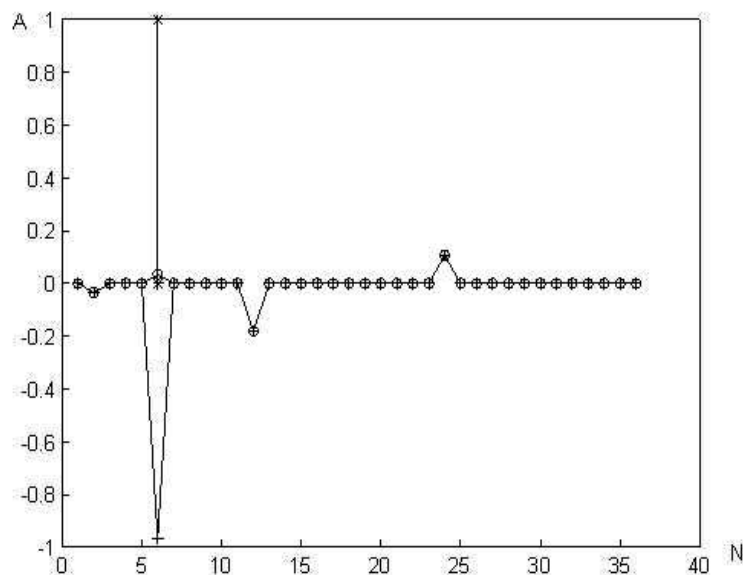


**Рис. 6.** Сравнение теоретических и измеренных смещений поверхности зеркала при модуляции треугольной комы. Непомеченные кривые соответствуют теоретическим расчетам, взятым с множителем 1.5. Крестики и кружки относятся к двум отдельным экспериментам, отличающимся величиной давления в разгрузочных мешках. Цифры сбоку рисунка означают величины усилий на толкателях.





**Рис. 7.** Результат компенсации aberrаций астигматизма и треугольной комы технологического зеркала телескопа Т-170. Непомеченная кривая спектр амплитуд полиномов Цернике главного зеркала телескопа до процесса компенсации aberrаций. Помеченная кривая - спектр остаточных aberrаций зеркала. По оси абсцисс отложены номера полиномов Цернике. По оси ординат величина амплитуды соответствующего полинома, выраженная в единицах длины волны интерферометра.



**Рис. 8.** Теоретическая модель компенсации aberrации астигматизма. Символы означают: “\*” – заданная величина амплитуды астигматизма до компенсации, “+” – спектр амплитуд полиномов Цернике оптимально компенсирующих астигматизм, “o” – амплитуды внесенных остаточных aberrаций после процедуры компенсации.

#### 4 Аберрация астигматизм

Генерацию астигматизма практически очень легко воспроизвести, нагружая только 4 толкателя, расположенных в виде креста. Однако при этом, если нагружать только одно кольцо, кроме астигматизма различных порядков появляется и составляющая комы первого порядка по  $\rho$ . Чтобы избежать ее появления, надо компенсировать момент усилий на опорах также, как и в случае генерации комы. Этот нежелательный эффект отсутствует если распределение усилий на управляющих кольцах подчиняется синусоидальной зависимости. На рис. 5 приведены сечения поверхности зеркала в фазе максимума астигматизма при нагрузках на отдельном толкателе в 1, 2, 3 кг. Как видим, теоретически рассчитанное отклонение поверхности зеркала, умноженное на 1.5 хорошо совпадает с реальным отклонением. Теоретически рассчитанные и экспериментально измеренные значения фаз астигматизма совпадают с точностью до 3-х градусов.

#### 5 Аберрация треугольная кома

Математическое выражение для аберрации треугольной комы приведено в таблице 1, – это полиномы  $Z_{9,10}$ . С помощью двух колец толкателей такую аберрацию в чистом виде нельзя получить, обязательно будут присутствовать заметные по величине амплитуды полиномов с такой же зависимостью от позиционного угла, т.е. полиномы NN 18,19 и NN 31,32. Для модуляции треугольной комы прилагались чередующиеся по знаку усилия в вершинах шестиугольника. Отдельно проводились испытания, как с внешним, так и с внутренним кольцом толкателей. На рис.6 показано смещение поверхности зеркала при нагрузке внешнего кольца толкателей в 1, 2, 3 кг. Теоретические значения умножены на коэффициент 1.5. Видно удовлетворительное согласие теории и эксперимента. Соответствие между теоретическим расчетом и реально измеренными величинами значительно хуже, чем в предыдущих случаях. Видимо это объясняется закреплением зеркала в опоре в вершинах треугольника, в результате чего генерируется дополнительная треугольная кома с другой фазой чем задаваемая. Расхождения между теорией и экспериментом еще более значительны при нагрузке внутреннего кольца толкателей. Теоретические и измеренные значения фаз совпадают с точностью  $\pm 5^\circ$ .

#### 6 Некоторый опыт компенсации аберраций

В спектре амплитуд полиномов Цернике, соответствующим уравнению поверхности ненагруженного зеркала телескопа Т-170, самые значительные амплитуды соответствуют аберрациям астигматизма, т.е. амплитуды NN 5, 6, 12, 13 и треугольной комы – т.е. амплитуды NN 9,10 (рис. 7 непомеченная кривая). Поэтому, в качестве первой попытки скорректировать форму зеркала, именно эти аберрации мы попытались удалить приложением определенных усилий на кольцах толкателей. Предварительно по ряду интерферограмм, соответствующих ненагруженному зеркалу, мы вычислили средние значения амплитуд и фаз данных аберраций. Затем мы рассчитали такое положение крестообразной и шестиугольной нагрузки, которое компенсирует аберрации зеркала. Для более точной подгонки фаз пришлось нагружать оба кольца толкателей, причем ориентации крестов на обоих кольцах были смещены. Конечно, компенсация аберраций усилиями, распределенными по синусоидальному закону, была бы точнее, однако в нашем распоряжении не было такого полного набора гирь. Эффект компенсации аберраций астигматизма и треугольной комы можно видеть на прилагаемых ниже рисунках. На рис. 7 приводятся спектры амплитуд полиномов Цернике ненагруженного зеркала телескопа Т-170 и аналогичный спектр поверхности после компенсации аберраций. Видно, что нам удалось компенсировать аберрации практически до уровня ошибок измерений. Интересно оценить, насколько вообще можно уменьшить аберрации зеркала, используя два кольца толкателей. С этой целью были проведены модельные расчеты среднего отклонения поверхности зеркала при наличии отдельных аберраций до компенсации изгибом и после оптимальной компенсации. Аберрации задавались в виде простого

выражения, достигающего максимума в  $1 \lambda$  на внешнем краю зеркала. Усилия, прилагаемые к управляющим кольцам, модулировались по синусоидальному закону. Отклонение поверхности зеркала оценивалось по формуле:

$$\bar{Z} = \frac{\int_0^{2\pi} d\pi \int_0^{\rho_0} abs(Z(\rho, \phi)) \rho d\rho}{\pi(1 - \rho_0^2)},$$

здесь  $\rho$  – радиус внутреннего отверстия зеркала. Результаты сведены в таблицу 2. Как видим из таблицы, среднее отклонение может быть уменьшено в 6-10 раз для каждой из рассмотренных aberrаций.

Таблица 2.

	Сферическая aberrация	Кома	Астигматизм	Треугольная кома
Математическая формула aberrации	$\rho^4$	$\rho^3 \cos \Theta$	$\rho^2 \cos 2\Theta$	$\rho^3 \cos 3\Theta$
Нагрузка на управляющих кольцах в кг	$P_{1,i} = -0.53$ $P_{2,i} = +0.53$	$P_{1,i} = -1.54 \cos \Theta$ $P_{2,i} = -0.93 \cos \Theta$	$P_{1,i} = -4.2 \cos 2\Theta$ $P_{2,i} = 2.55 \cos 2\Theta$	$P_{1,i} = 0.0$ $P_{2,i} = 3.6 \cos 3\Theta$
Среднее отклонение до компенсации	0.396	0.298	0.370	0.298
Среднее отклонение после компенсации	0.099	0.034	0.055	0.019

Можно еще другим способом прокомментировать математическую сторону процесса компенсации aberrаций. Рассмотрим, например, aberrацию астигматизма. На рис.8 прямая, помеченная значком “\*”, соответствует заданной величине aberrации астигматизма  $1\lambda$ . Ломаная кривая помеченная значком “+”, соответствует спектру амплитуд полиномов Цернике поверхности изогнутого зеркала, оптимально компенсирующего заданную aberrацию. Ломаная кривая, помеченная значком “o”, соответствует остаточному спектру aberrаций зеркала после коррекции астигматизма. Как видим амплитуда основной гармоники уменьшена более чем в 20 раз, однако стали значимыми амплитуды полиномов NN 12, 14, соответствующие астигматизму более высокого порядка. Они и дают основной вклад в среднее теоретическое отклонение поверхности зеркала после компенсации астигматизма, приведенное в таблице 2.

## 7 Заключение

В работе приводятся результаты испытаний на изгиб технологического зеркала телескопа Т-170. Изгиб зеркала производился с помощью 36 толкателей, расположенных на двух концентрических окружностях. Нагрузка на толкателях обеспечивала возникновение на зеркале оптических aberrаций 3-го порядка с амплитудой около 0.6 мкм. Показано, что сферическая aberrация, кома, астигматизм и треугольная кома могут быть сгенерированы по отдельности, т.е. практически чистыми. Установлена связь между величиной усилий на толкателях и амплитудой и фазой возникающих aberrаций. Обнаружено, что амплитуда возникающих aberrаций в 1.5 раза больше ее теоретического значения, тогда как фазы совпадают. Видимо, это объясняется неточностью знания модуля упругости материала зеркала. Таким образом, если известны амплитуды и фазы aberrаций зеркала, то, прилагая определенные усилия к управляющим кольцам толкателей, возможна компенсация aberrаций. Эксперимент подобного рода был проделан. С помощью рассчитанных усилий на управляющих кольцах толкателей удалось практически удалить значительные aberrации астигматизма и треугольной комы зеркала.

**Литература**

Барроуз (Burrous C.) // The First Year of HST Observations. A. Kinney, J. Blades (eds.) Baltimore, MD: StSciInst. 1991.

Нолл (Noll R.J.) // Journal Opt. Sos. Am. 1976. V.66. P. 207.

Ноэт (Noethe L., Franca F., Giordano P.) // Journal of Modern Optics. 1988. V. 35. No. 9. P. 1427.

Швезингер (Schwesinger G.) // Journal of Modern Optics. 1988. V. 35. No. 7. P. 1117.

2)