

## Введение.

Успешное решение на ОАО «ЛЗОС» задач по созданию прогрессивной технологии формообразования крупногабаритной высокоточной асферической оптики, включающих в себя модернизацию автоматизированного специального станочного парка (станки серии АД и КУ-168) с компьютерным управлением, новейших способов и приборов оптического контроля, решение многообразных проблем базирования и разгрузки крупногабаритных оптических деталей при их производстве позволяют с большей вероятностью в успехе приступить к работам по повышению оптических характеристик главного зеркала БТА №1 путем ремонта его рабочей поверхности с последующей ее асферизацией и доводкой малым инструментом в автоматизированном цикле.

Известно, что высокоточные зеркальные элементы современных оптических устройств рассчитываются и проектируются совместно со штатными оправами как единые функциональные системы, предусматривающие определенную схему базирования и учитывающие наивыгоднейшее расположение опорных точек разгрузки. Поэтому справедливо утверждение о том, что оптические испытания и возможные доводочные операции формообразования оптических деталей, в особенности зеркал телескопов, необходимо проводить в штатных или специальных технологических оправах. Следует отметить, что одним из основных условий воспроизведения точностных характеристик зеркал при их перебазировке из технологических оправ в штатные является полная идентичность схем базирования и опорных точек разгрузки. Способ разгрузки в технологических оправах может отличаться от способа разгрузки, принятого в штатных оправах (ОМП, 1983 №11, стр. 54).

Однако в реальных условиях производства эти условия не всегда удается выполнить.

Так при производстве ГЗ БТА №1 (рис. 1, см. приложение) в законченном научно-техническими специалистами ЛОМО на территории термостойкого цеха ЛЗОС в 1975 г. штатная оправка телескопа на станке КУ-168 при шлифовании, асферизации и полировании рабочей поверхности не применялась.

Внимание!: В научно-технической литературе этого времени было широко распространено обратное утверждение об использовании штатной разгрузки при доводке ГЗ БТА №1 (Н.П. Заказнов, В.В. Горелик «Изготовление асферической оптики» 1978 стр. 179; Создание Большого Азимутального Телескопа БТА стр. 21).

Это обстоятельство объясняется следующими причинами.

А. В условиях производства, при обработке ГЗ БТА №1 на станке КУ-168 полноразмерными и с меньшими габаритами шлифовальниками и полировальниками, массу последних, а также статические и динамические усилия, возникающие при опрессовке смолы и взаимном контакте зеркала с этими инструментами в штатной оправке воспринимать нечем. Это утверждение объясняется тем, что каждая из 60-ти рычажных торцевых разгрузок рассчитана и настраивается только на восприятие 1/60 массы зеркала. Дополнительных устройств эффективно воспринимающих массу инструментов и динамические нагрузки в штатную оправку сотрудниками ЛОМО ввести не удалось.

Б. Конструктивная особенность штатной оправы ГЗ БТА состоит в том, что комбинированные торцевые и радиальные рычажные разгрузки находятся в полости корпуса оправы и контактируют с зеркалом в шестидесяти тыльных отверстиях, опоры монтируются в зеркало снизу и крепятся к корпусу штатной оправы. Для обслуживания зеркала в телескопе БТА такое решение является естественным. Любая из опор доступна и может быть отремонтирована или подвергнута необходимой регулировке при эксплуатации телескопа. Имеется открытый подход к регулируемым домкратам. В случае установки штатной оправы совместно с ГЗ БТА для

обработки на стол станка КУ-168 доступность к разгрузкам и регулируемым домкратам ограничена полностью, возможность их дистанционных регулировок отсутствует. Кроме того узел «штатная оправа – ГЗ БТА» в сборе при установке на станок КУ-168 не может быть надежно закреплен к торцевой поверхности стола.

Изначально в проекте станка КУ-168 (Т.З. ЛОМО) были предусмотрены:

- торцевая сильфонная система разгрузки зеркала, количество и расположение опор которой была аналогична положению разгрузочных отверстий в зеркале;

- радиальная разгрузка в «ленте» (рис. 2, см. приложение), которая шарнирно закреплялась на поворотном столе и контактировала «в полуобхват» с цилиндрической поверхностью зеркала через резиноканевые прокладки. Убедившись в практической невозможности проведения окончательных операций доводки ГЗ БТА №1 в штатной разгрузке, дальнейшая обработка происходила с использованием торцевой гидроразгрузки с контролем зеркала «в ленте» вплоть до сдачи ГЗ БТА №1 Госкомиссии.

Положительный опыт изготовления ГЗ БТА №2 в рычажно-гидравлической технологической разгрузке, в работе по ремонту ГЗ БТА №1 применим быть не может из-за утраты работоспособности опор гидросистемы технологической разгрузки за более чем 25 летний срок хранения.

При проведении модернизации корпуса технологической оправы ГЗ БТА №2 для использования в работах по ремонту рабочей поверхности ГЗ БТА №1, путем оснащения его штатными рычажными разгрузками телескопа, современные проектировщики не учли опыта полученного специалистами ЛОМО при изготовлении ГЗ БТА №1 (см. пункты А и Б).

Перед принятием решения о начале работ с ГЗ БТА №1 на ОАО «ЛЗЭС» были разработаны «Мероприятия по подготовке производства к проведению работ на Главном зеркале телескопа БТА», которые переданы САО АН РФ для ознакомления. «Мероприятия...» основывались на единственно возможном решении производить предварительную и окончательную обработку рабочей поверхности зеркала на станках КУ-158(алмазное точение) и КУ-168(доводка) при базировании зеркала на вогнутой чугунной подложке с дискретными резинофторопластовыми опорами (60 шт.), расположение которых аналогично расположению разгрузочных отверстий в зеркале (рис. 3, см. приложение).

Вогнутая сферическая ( $R = 48050\text{мм}$ ) установочная поверхность подложки будет с максимально достижимой точностью проточена на модернизированном станке КУ-158. Подложка с зеркалом будет установлена на поворотной платформе стола станка КУ-168 снабженной «лентой» радиальной разгрузки для проведения операций доводки и оптического контроля рабочей поверхности зеркала (рис. 4, см. приложение)

## **Дополнительные аргументы в защиту утверждения о невозможности использования штатных разгрузок на модернизированном корпусе технологической оправы при работах с ГЗ БТА №1.**

Позитивные моменты.

В. Корпус модернизированной технологической оправы может быть жестко и надежно закреплен на столе станка КУ-168 с помощью 12 болтовых соединений М48 в зоне центрального стакана и на периферии.

Г. Корпус модернизированной технологической оправы предназначен для установки снизу вновь изготовленных 60-ти штатных разгрузок, центрального стакана и 6 домкратов. Для чего корпус должен быть поднят над уровнем пола цеха на высоту ~ 1,8 м и установлен на специальном стапеле, обеспечивающим свободный доступ к местам монтажа штатных разгрузок. При этом сохраняется объем и порядок настроечных и монтажных операций, как и в штатной оправе телескопа с ГЗ БТА.

Негативные моменты.

Д. В проекте модернизации корпуса технологической оправы не предусмотрена возможность подъема крупнотоннажного и крупногабаритного узла «зеркало-оправа» в сборе из-за отсутствия надлежащих такелажных устройств на периферии корпуса, подобных тем, какие были введены в конструкцию контейнера для перевозки ГЗ БТА.

Е. В случае установки модернизированной технологической оправы с опорами штатной разгрузки на стол станка КУ-168 без ГЗ БТА и его надежного закрепления на столе, последующий монтаж ГЗ БТА на опоры разгрузки и центральный стакан невыполним ни практически, ни теоретически. Это обстоятельство является основным негативным фактором исключающим использование штатной разгрузки при работах с ГЗ БТА.

Ж. Изложенные основные аргументы говорят о следующей целесообразности продолжения работ по ремонту отражающей поверхности ГЗ БТА №1:

Следует отказаться:

- от запланированного изготовления штатных разгрузок и сопутствующих узлов штатной оправы;
- от модернизации и дополнительной обработки корпуса технологической оправы

Следует принять к исполнению:

- способ торцевой разгрузки ГЗ БТА №1 на жесткой сферической вогнутой подложке снабженной упругими прокладками (рис. 3 и 4, см. приложение).

Такая торцевая разгрузка будет реализована на этапах:

- предварительного алмазного точения рабочей поверхности зеркала;
  - шлифования и асферизации поверхности;
  - окончательной доводки малым инструментом.
- способ радиальной разгрузки ГЗ БТА №1 в ленте подвеса (98% массы) и торцевой опоре на подложку (2% массы) на этапах оптического контроля.

Современные численные методы (м.к.э.) дают возможность проанализировать возникающие деформации рабочей поверхности ГЗ БТА при оптическом контроле зеркала в ленте подвеса в виде топографических карт, которые раскрывают характер, величину и расположение деформированных зон на поверхности зеркала. Это обстоятельство предполагает возможность учесть эти деформации при принятии технологических решений для назначения сеансов доводки рабочей поверхности зеркала.

Это в конечном счете позволит значительно улучшить качество формы рабочей поверхности ГЗ БТА №1.

Ниже приводятся результаты численных оценок оптических характеристик поверхности ГЗ БТА при использовании различных схем его радиальной и торцевой разгрузки.

Расчет деформаций ГЗ БТА проводили две независимые экспертные группы.

## **2. Численная оценка оптических характеристик поверхности зеркала БТА №1 (данные ОАО «ЛОМО»)**

2.1 В настоящем расчете приведена численная оценка оптических характеристик зеркала в системе штатной разгрузки БТА.

Расчеты проводились методом конечных элементов с использованием программы «NASTRAN».

Расчет зеркала выполнен в соответствии с гипотезами теории упругости, которые не учитывают влияние внутренних напряжений, предполагают материал изотропным, однородным, без свилей и трещин и отвечающий требованиям последствия.

Проведены расчеты деформаций зеркала и определены среднеквадратические отклонения (СКО) формы рабочей поверхности зеркала для четырех положений оптической оси:

- вертикального положения, когда работают только торцевые штатные разгрузки;
- горизонтального положения, когда работают только радиальные штатные разгрузки;
- под углом  $45^\circ$  к вертикали, когда работают штатные торцевые и радиальные разгрузки;
- под углом наклона оптической оси к горизонтали -  $12^\circ$ . Зеркало опирается на 60 упругих резиновых опор расположенных аналогично штатным разгрузкам. Радиальная разгрузка в ленте. (Без учета сил трения).

### **2.2 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ**

Доработанное главное зеркало БТА представляет собой сплошную менисковую пластину диаметром 6,050 м с центральным отверстием диаметром 0,36 м, толщиной 0,642 м. Отражающая поверхность зеркала – параболоид вращения с радиусом кривизны  $R = 48,0$  м.

Разгрузка зеркала осуществляется по методу Ласселя на 60 радиальных и торцевых опорах при одинаковых значениях разгружающих усилий.

В местах расположения разгрузок в зеркале выполнены 60 отверстий.

Точки разгрузки зеркала расположены на четырех концентрических окружностях:

на первом радиусе  $r_1 = 0,6294$  м – 6 точек разгрузки;

на втором радиусе  $r_2 = 1,3225$  м – 12 точек разгрузки;

на третьем радиусе  $r_3 = 1,9978$  м – 18 точек разгрузки;

на четвертом радиусе  $r_4 = 2,7310$  м – 24 точки разгрузки.

Система разгрузки главного зеркала состоит из шестидесяти механизмов торцевой разгрузки и такого же количества механизмов радиальной разгрузки. Все механизмы рычажного типа. Рычаги механизмов радиальной разгрузки размещаются внутри отверстий в зеркале и создают усилия, направленные перпендикулярно оси зеркала таким образом, чтобы точка приложения их равнодействующей совпала с центром тяжести зеркала. Рычаги торцевых разгрузок, по два в каждом, размещаются симметрично около отверстий и создают усилия, направленные параллельно оси зеркала.

## 2.3 РАСЧЕТНЫЕ СЛУЧАИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НАГРУЗКИ

Расчет деформаций отражающей поверхности зеркала под действием гравитационных сил проводятся для четырех положений оптической оси зеркала:

- ось вертикальна;
- ось горизонтальна;
- ось под углом  $45^\circ$  к вертикали;
- ось под углом  $12^\circ$  к горизонту.

## 2.4 ОПИСАНИЕ КОНЕЧНО – ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

Конструкция зеркала описана 112093 твердотельными элементами типа SOLID.

Расчет СКО проводится по перемещениям 5039 узлов, расположенных на рабочей поверхности зеркала. В расчетной модели зеркало от перемещений

вдоль оптической оси закреплено по трем отверстиям, расположенным на третьем радиусе разгрузок через  $120^\circ$ . От поперечных разгрузок зеркало закреплено в четырех узлах, расположенных через  $90^\circ$  в центральном отверстии.

Вид конечно элементной модели приведен на рисунке 2.4.1

## 2.5 РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕРКАЛА НА ТОРЦЕВЫХ РАЗГРУЗКАХ

Оптическая ось зеркала расположена вертикально.

В местах расположения торцевых разгрузок к зеркалу приложены разгружающие усилия  $N = G_3/60 = m_3 \cdot g/60 = 40700 \cdot 9,81/60 = 6247,5 \text{ Н}$ .

В направлении противоположном оптической оси задано ускорение  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Результаты расчета деформаций зеркала приведены на рисунке 2.5.1, 2.5.2. Максимальный размах деформаций в направлении оптической оси равен  $\delta_{\max}^B = 0,364 \text{ мкм}$ .

По полученным перемещениям узлов конечно-элементной модели, расположенным на рабочей поверхности зеркала, проведен расчет среднеквадратического отклонения формы поверхности.

Среднеквадратическое отклонение  $\delta_{\text{СКО}}$  формы поверхности рассчитывалось по формуле для стандартного отклонения, входящего в пакет EXCEL.

$$\delta_{\text{СКО}} = \sqrt{\frac{n \cdot \sum y^2 - (\sum y)^2}{n(n-1)}},$$

где  $n$  – число узлов на рабочей поверхности зеркала;

$y$  – перемещение узла в направлении оптической оси зеркала.

Среднеквадратическое отклонение по волновому фронту равно  $\delta_{\max}^{B\Phi} = 2\delta_{\text{СКО}}$  поверхности.

Среднеквадратическое отклонение по волновому фронту рабочей поверхности зеркала на торцевых разгрузках  $(\delta^{\text{B}\Phi}_{\text{max}})_{\text{в}} = 0,08\lambda$ , где  $\lambda = 6328$  мкм – длина волны.

## 2.6 РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕРКАЛА НА РАДИАЛЬНЫХ РАЗГРУЗКАХ

Оптическая ось зеркала расположена горизонтально.

В центрах масс элементарных объемов зеркала приложены 60 разгружающих усилий  $Q = 6247,5$  Н.

В направлении перпендикулярном оптической оси зеркала задано ускорение  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Результаты расчета деформаций зеркала приведены на рисунках 2.6.1, 2.6.2 и 2.6.3.

Максимальный размах деформаций равен  $\delta^{\Gamma}_{\text{max}} = 0,437$  мкм.

Среднеквадратическое отклонение формы рабочей поверхности по волновому фронту  $(\delta^{\text{B}\Phi}_{\text{max}})_{\Gamma} = 0,2\lambda$ , где  $\lambda = 6328$  мкм.

## 2.7 РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕРКАЛА ПРИ УГЛЕ НАКЛОНА ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ 45°

При угле наклона оптической оси 45° работают одновременно торцевые и радиальные разгрузки.

Заданы торцевые и радиальные разгружающие усилия, равные

$$N_1 = N \cdot \sin 45^\circ \text{ и } Q_1 = Q \cdot \cos 45^\circ.$$

Заданы ускорения  $a_x = a_y = 6,94$  м/с<sup>2</sup>.

Результаты расчета деформаций зеркала приведены на рисунке 2.7.1.

Максимальный размах деформаций равен  $\delta^{45^\circ} = 0,513$  мкм.

Среднеквадратическое отклонение формы рабочей поверхности по волновому фронту  $(\delta^{ВФ}_{СКО})_{45} = 0,19\lambda$ , где  $\lambda = 6328$  мкм.

## 2.8 РАСЧЕТ ДЕФОРМЦИЙ ЗЕРКАЛА УСТАНОВЛЕННОГО ПОД УГЛОМ $12^\circ$ К ГОРИЗОНТАЛИ.

Зеркало опирается по торцу на 60 упругих резиновых опор, расположенных аналогично штатным разгрузкам. Торцевые опоры закреплены на монолитной чугунной «подложке» проточенной под вогнутую сферу радиусом  $R = 48,0$  м. «Подложка» жестко закреплена на поворотном столе станка КУ-168. Радиальная разгрузка зеркала в ленте, закрепленной шарнирно на поворотном столе станка КУ-168. рис. 2.8.1, 2.8.2 и 2.8.3  $СКО = 0,21\lambda$ .

### ЗЕРКАЛО НА ТОРЦЕВОЙ ШТАТНОЙ РАЗГРУЗКЕ (Рис. 2.5.1 и 2.5.2)

$$(\delta^{ВФ}_{СКО})_{\text{поверхн.}} = 0,08\lambda$$

### ЗЕРКАЛО НА РАДИАЛЬНОЙ ШТАТНОЙ РАЗГРУЗКЕ (Рис. 2.6.1 и 2.6.2)

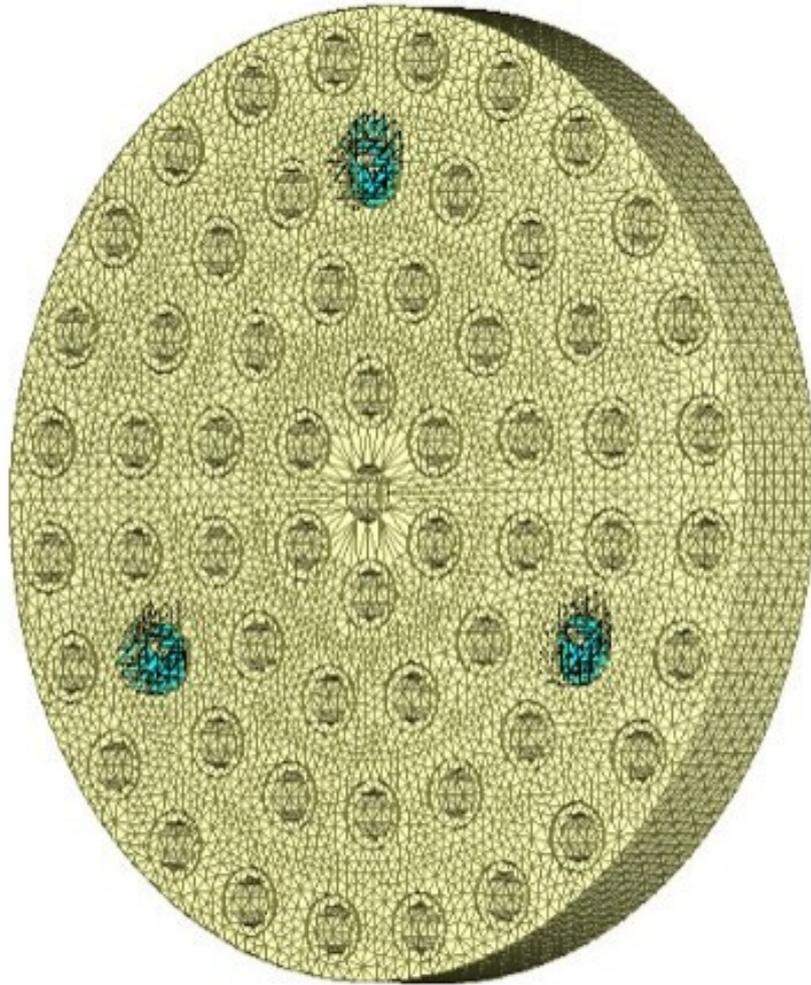
$$(\delta^{ВФ}_{СКО})_{\text{поверхн.}} = 0,2\lambda$$

для угла  $45^\circ$  к вертикали:

$$(\delta^{ВФ}_{СКО})_{\text{поверхн.}}^{45^\circ} = 0,19\lambda \quad (\text{рис. 2.7.1})$$

### ЗЕРКАЛО В ЛЕНТЕ И НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТОРЦОВОЙ ПОДЛОЖКЕ (Рис. 2.8.3)

$$(\delta^{ВФ}_{СКО})_{\text{поверхн.}}^{12^\circ} = 0,21\lambda$$



Конечно-элементная модель зеркала

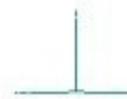
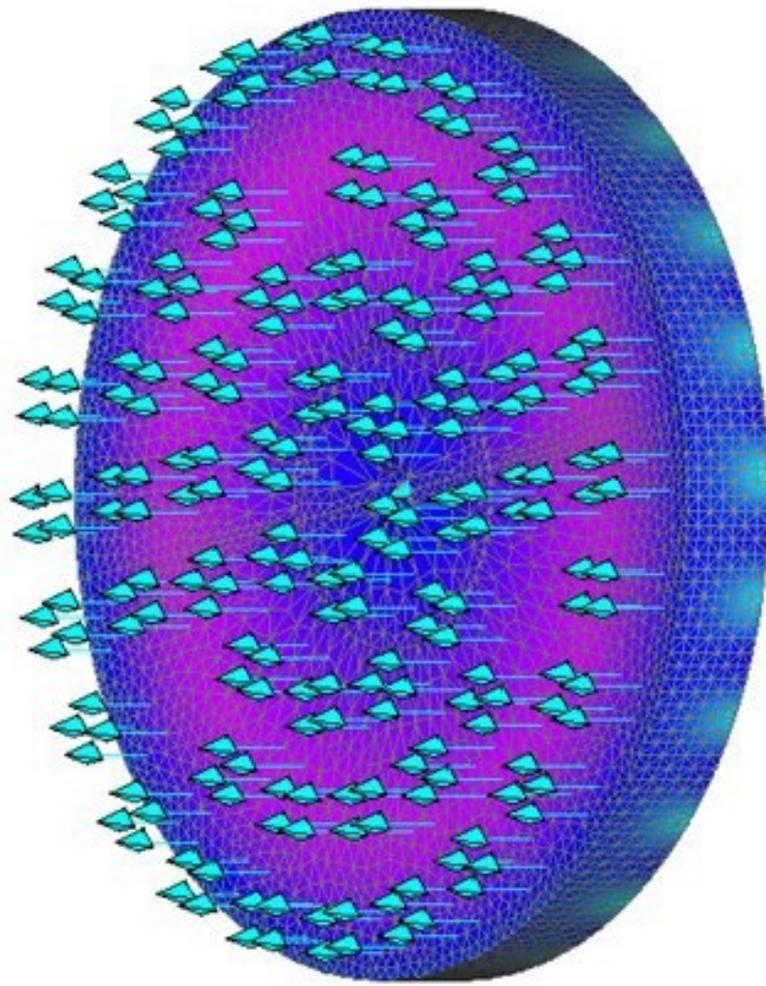


Рис. 2.4.1

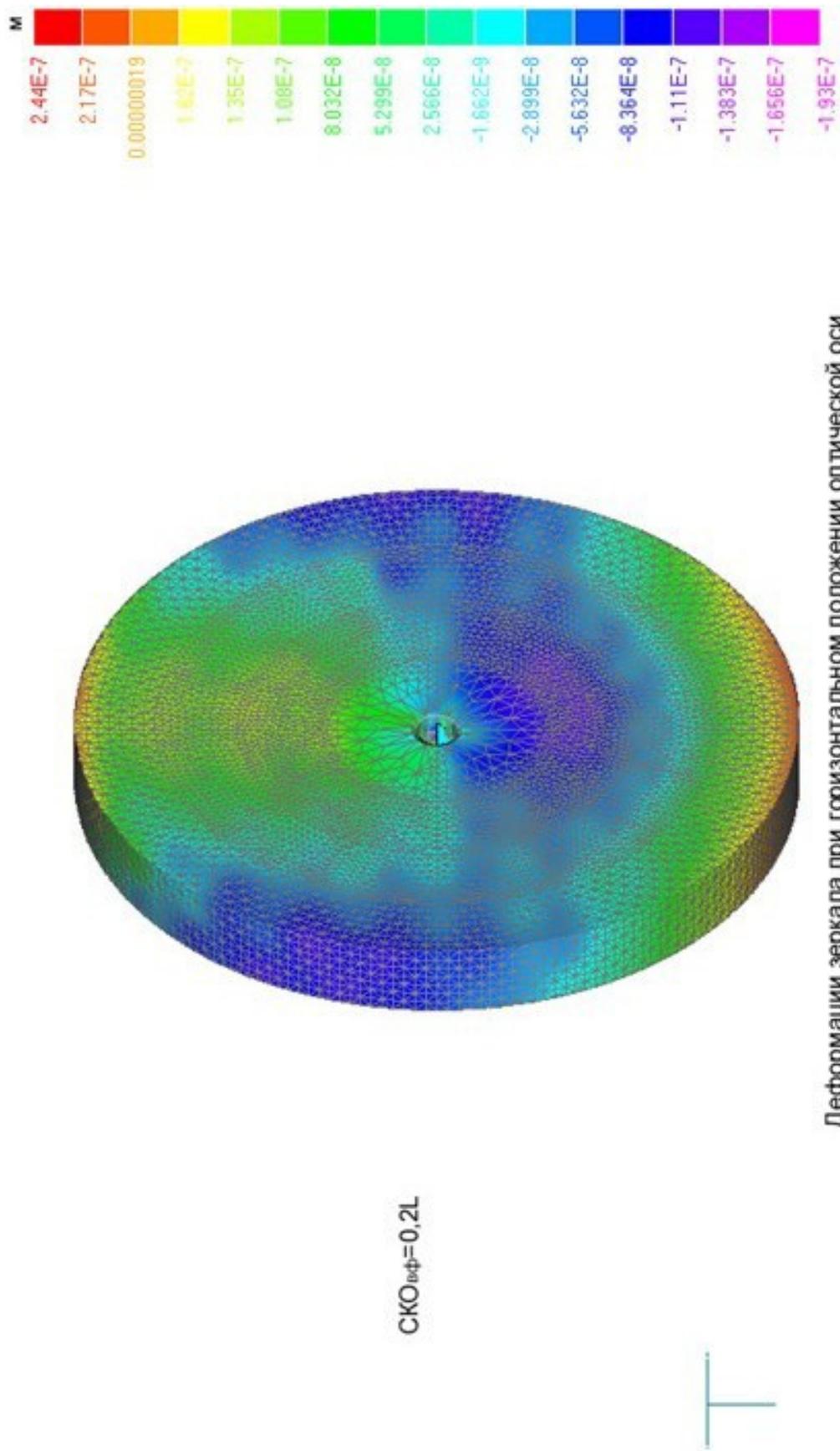


СКОВφ=0,08L

Деформации зеркала на торцевых нагрузках

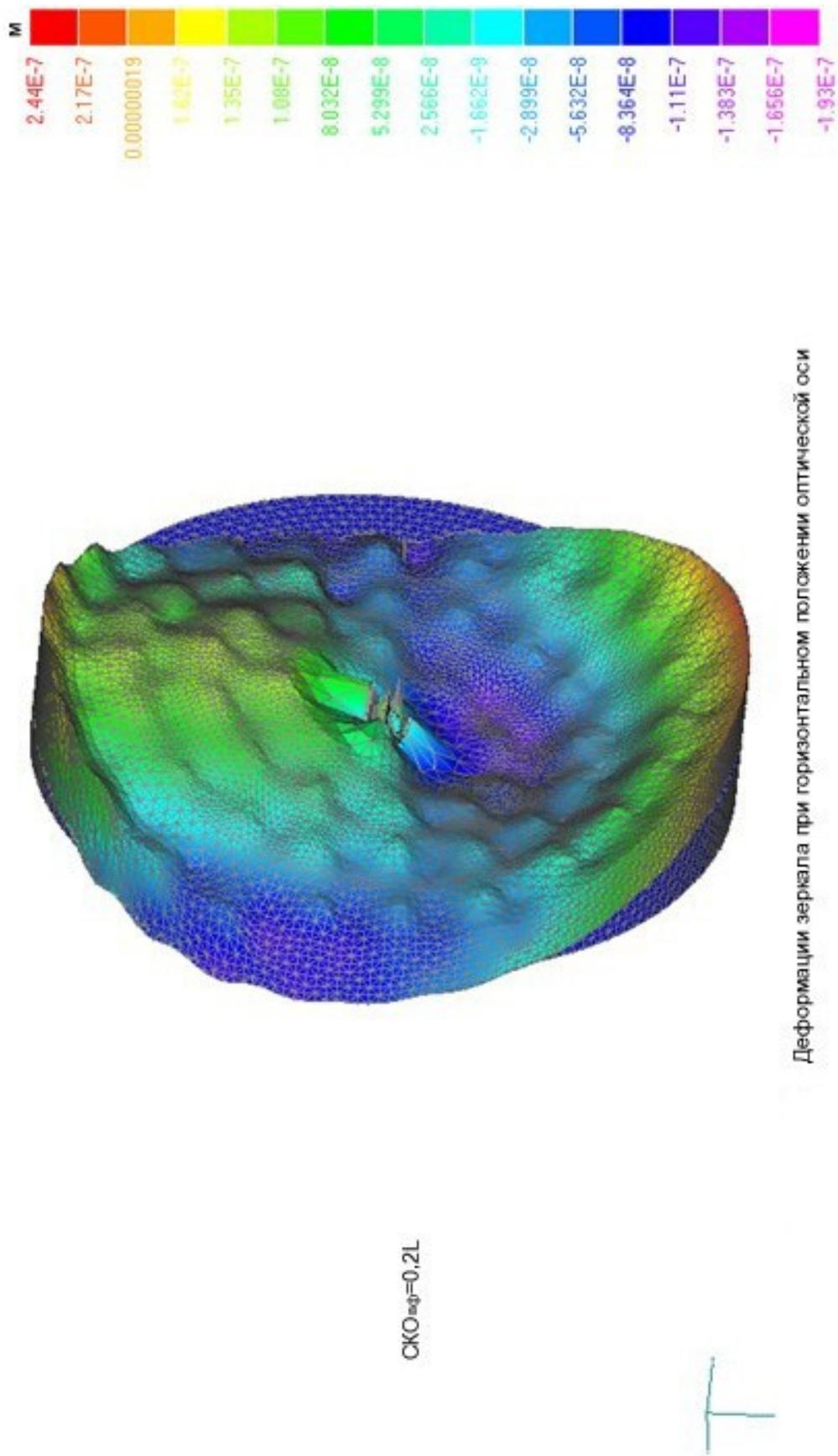
Рис. 2.5.2

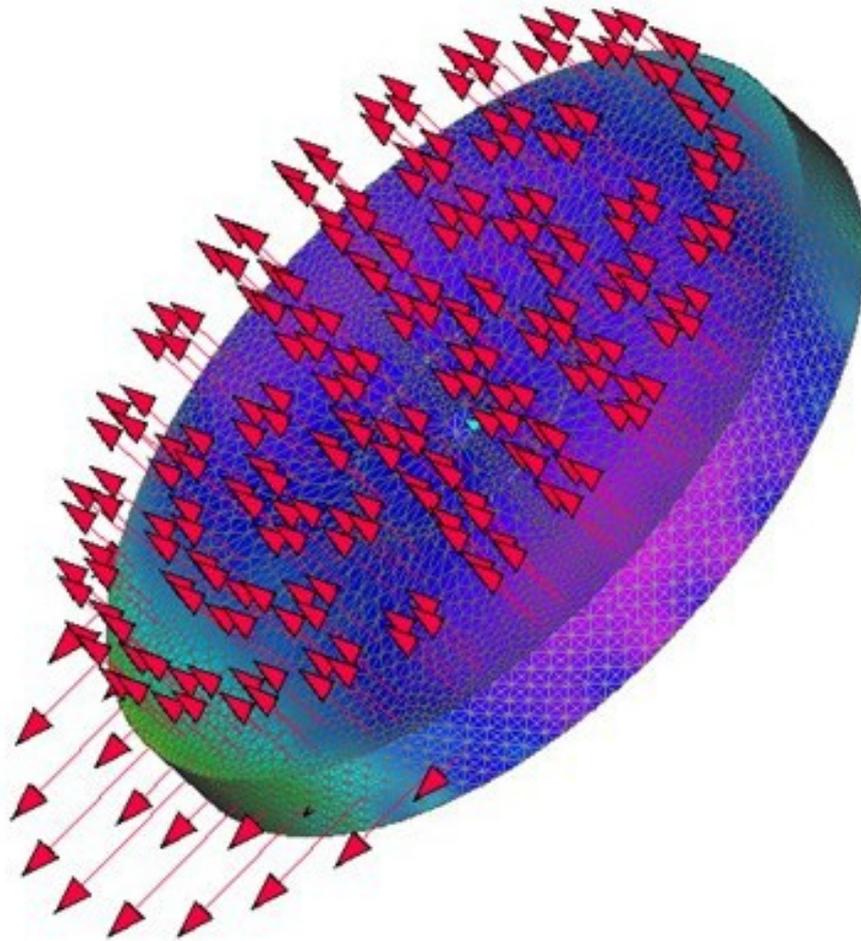
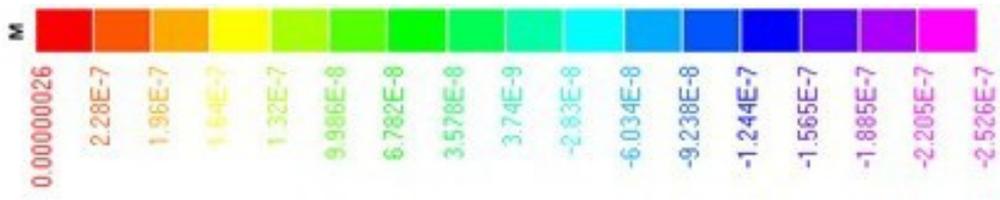
Рис. 2.6.2.



Деформации зеркала при горизонтальном положении оптической оси

Рис. 2.6.3



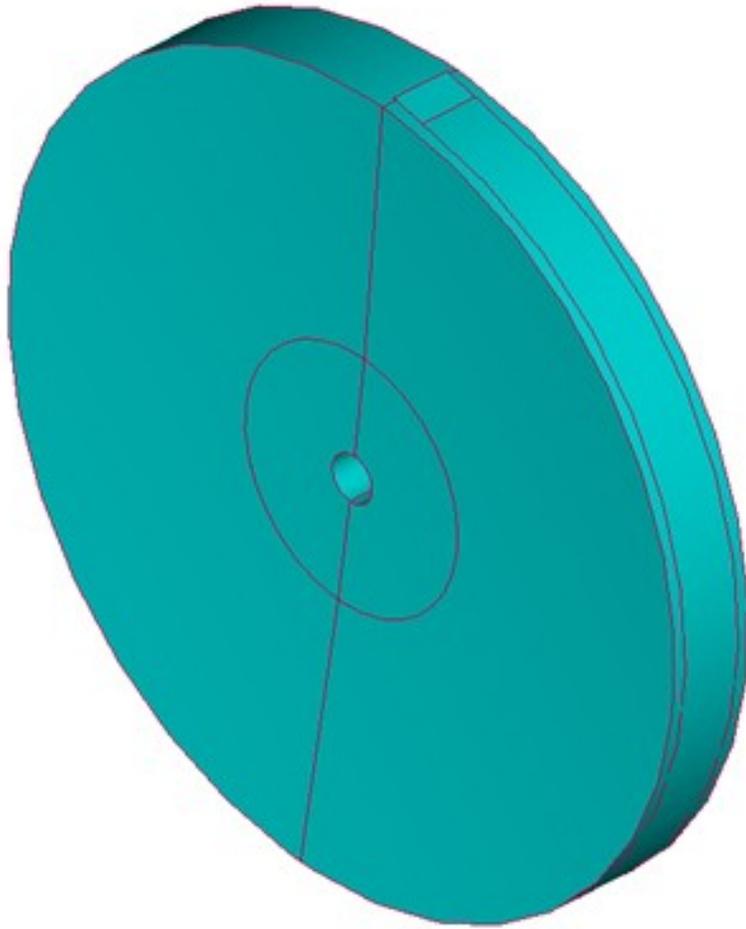


CKO<sub>нф</sub>=0, 19L



Деформации зеркала при наклоне оптической оси 45 гр.

Рис. 2.7.1



Расположение ленты на зеркале

Рис. 2.8.2

Угол наклона оптической оси 12 гр. Задано опирание на 60 площадок технологической платформы вдоль оптической оси опирание на ленту

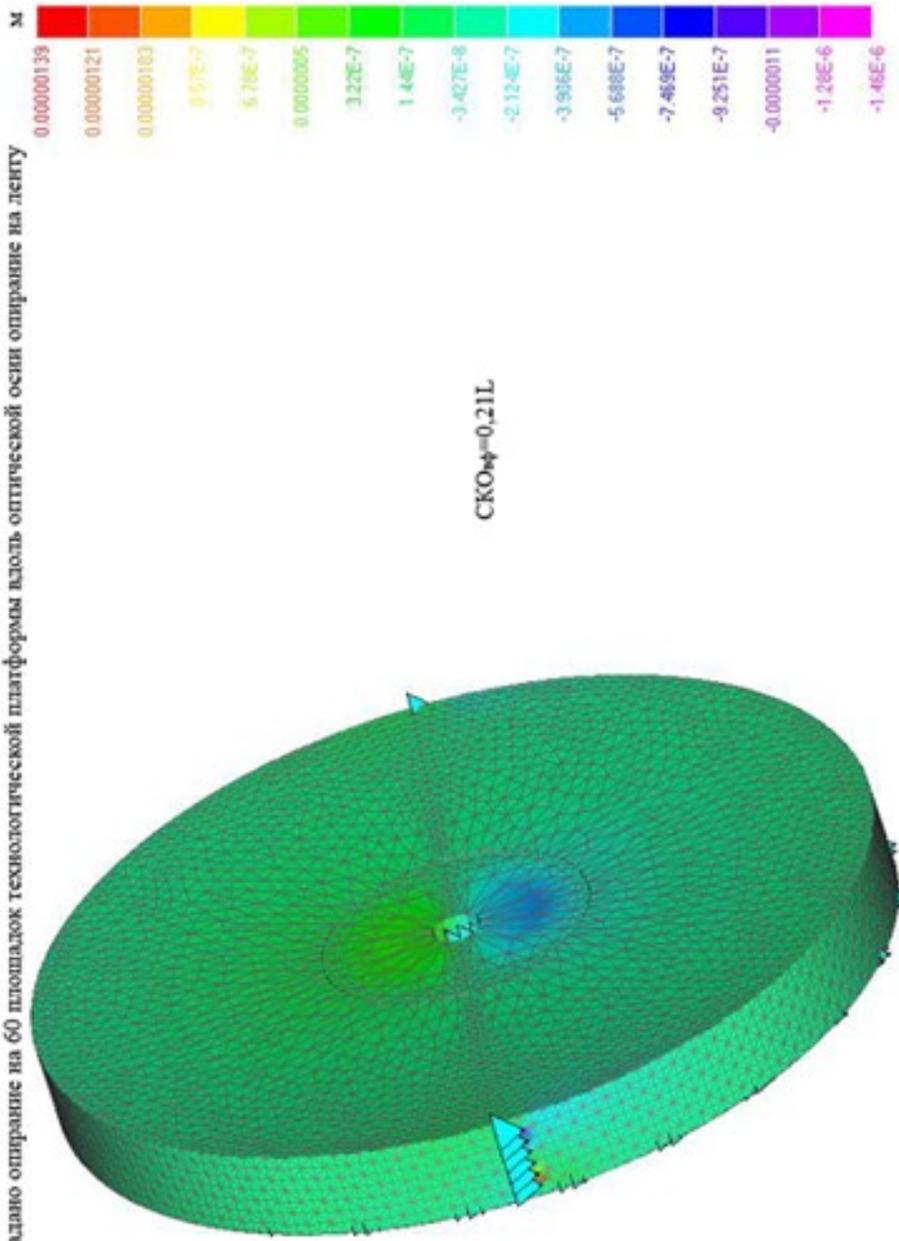


Рис. 2.8.3

### 3. Численное исследование ошибки оптической поверхности ГЗ БТА для различных схем его разгрузки и базирования (данные ФГУП КБ им. Лавочкина).

3.1 Численные исследования, результаты которых приводятся ниже, выполнены для схемы контроля формы ГЗ БТА с осью визирования  $12^\circ$  к горизонту. При этом торцевая разгрузка зеркала осуществляется за счет его базирования на чугунной подложке, вогнутая сферическая поверхность которой проточена с максимально достижимой точностью под сферу с  $R=48.050$  м. Радиальная разгрузка осуществляется за счет давления ленты подвеса, равномерно распределенного на половине окружности цилиндрической боковой поверхности (рис. 2,3 и 4).

Важным для рассматриваемой схемы разгрузки является то, что основная составляющая суммарной ошибки определяется разгрузкой "в ленте":

- лента воспринимает  $(M \cdot g \cdot \cos(12^\circ) / M \cdot g) \cdot 100\% = 98\%$  веса зеркала;
- собственная жесткость зеркала при положении осью визирования "в горизонт" даже в штатной оправе меньше, чем осью "в зенит" (см. далее).

Поэтому, основное внимание в исследованиях уделено деформированию оптической поверхности (ОП) зеркала при его разгрузке осью визирования горизонтально.

Исходные данные к расчетам:

- масса зеркала – 40643 кг,
- центровка зеркала в ГСК – 0,38126 м (начало ГСК находится в точке пересечения тыльной сферы  $R=48,050$  м с продольной осью (Y) зеркала),
- инерционные ускорения нагружения:  $A_z = -g \cdot \cos(12^\circ)$  //  $A_y = +g \cdot \sin(12^\circ)$ ,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ,
- равнодействующая поперечной нагрузки лежит в плоскости на  $\Delta y = +1$  мм (в ГСК) отстоящей от плоскости ц.м. зеркала,

- от смещения "как жесткого целого" зеркало удерживается  $3 \times 2 = 6$  кинематическими связями (касательное + осевое направления), приложенными в узлах модели. Закрепленные узлы расположены равномерно с шагом  $120^\circ$  на окружности  $R=2,3375$  м (окружность 6-ти мест под жесткие опоры) в плоскости, отстоящей от плоскости ц.м. зеркала на  $\Delta y = -2$  мм (осевые реакции в этих связях:  $2 \times 50$  Н +  $1 \times -100$  Н; боковые реакции – менее 1 Н).

Приведенные ниже данные содержат сведения о геометрических параметрах оптической поверхности зеркала в терминах разложения аббераций в полиномиальный ряд Цернике.

В приведенных результатах принята следующая терминология:

$\lambda = 632 \text{ нм (0,632 мкм)}$ ;

PV = размах деформаций оптической поверхности (ОП) – алгебраическая разность между максимальным и минимальным смещением произвольных точек, лежащих на ОП, после деформирования зеркала;

RMS = среднеквадратическое отклонение деформированной поверхности зеркала от теоретического контура, заданного по чертежу.

В принятом разложении ряда Цернике:

$RN_j = R_j/R_{\max}$  – нормированный радиус «в плане» до узла конечно-элементной модели, лежащего на ОП зеркала

$R_{\max}$  = радиус апертуры ОП зеркала,

$\varphi_j$  = угол «в плане» до узла конечно-элементной модели, лежащего на ОП зеркала,

$s_{j,1}$  - коэффициент в разложении, соответствующий смещению ОП зеркала в направлении оси визирования, как «жесткого целого»,

$s_{j,2}$ ,  $s_{j,3}$  – коэффициенты в разложении, соответствующие поворотам ОП зеркала, как «жесткого целого», относительно двух осей, перпендикулярных, как между собой, так к оси визирования зеркала,

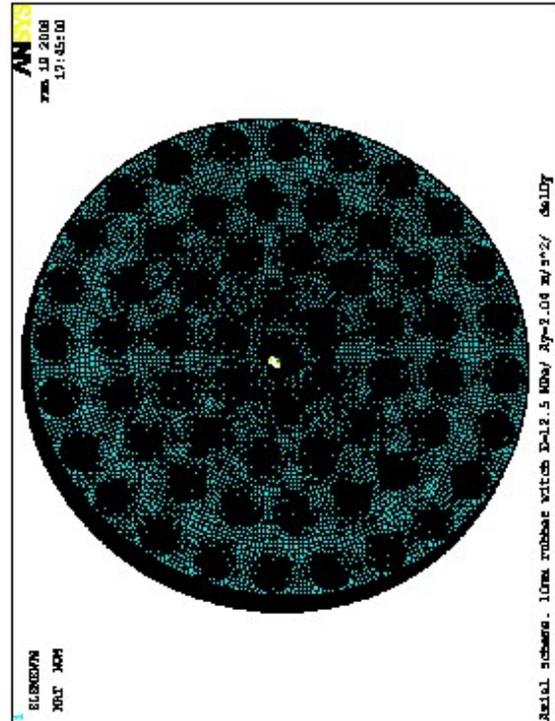
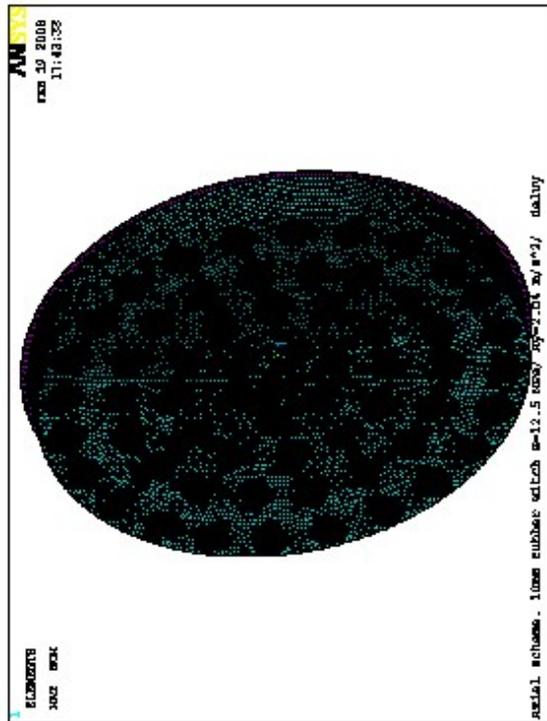
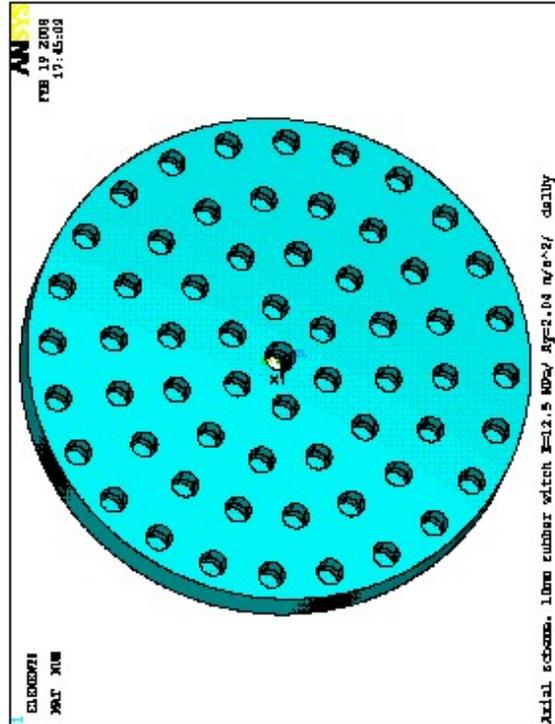
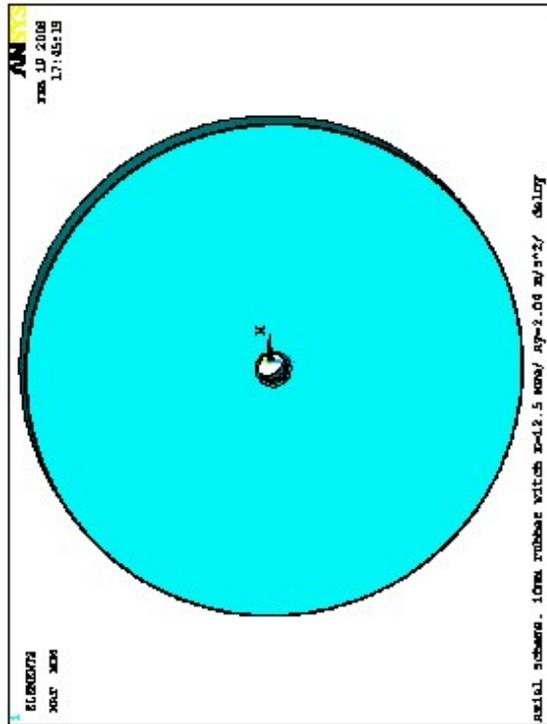
$s_{j,4}$  – коэффициент, соответствующий дефокусировке зеркала.

## Используемый полиномиальный ряд Цернике

```

A := s
for j ∈ 1..rows(XY_PLAN)
  sj,1 ← 1
  sj,2 ← √4·RNj·cos(ψj)
  sj,3 ← √4·RNj·sin(ψj)
  sj,4 ← √3·[2·(RNj)2 - 1]
  sj,5 ← √6·(RNj)2·sin(2·ψj)
  sj,6 ← √6·(RNj)2·cos(2·ψj)
  sj,7 ← √8·[3·(RNj)3 - 2·RNj]·sin(ψj)
  sj,8 ← √8·[3·(RNj)3 - 2·RNj]·cos(ψj)
  sj,9 ← √8·(RNj)3·sin(3·ψj)
  sj,10 ← √8·(RNj)3·cos(3·ψj)
  sj,11 ← √5·[6·(RNj)4 - 6·(RNj)2 + 1]
  sj,12 ← √10·[4·(RNj)4 - 3·(RNj)2]·cos(2·ψj)
  sj,13 ← √10·[4·(RNj)4 - 3·(RNj)2]·sin(2·ψj)
  sj,14 ← √10·(RNj)4·cos(4·ψj)
  sj,15 ← √10·[(RNj)4·sin(4·ψj)]
  sj,16 ← √12·[10·(RNj)5 - 12·(RNj)3 + 3·RNj]·cos(ψj)
  sj,17 ← √12·[10·(RNj)5 - 12·(RNj)3 + 3·RNj]·sin(ψj)
  sj,18 ← √12·[5·(RNj)5 - 4·(RNj)3]·cos(3·ψj)
  sj,19 ← √12·[5·(RNj)5 - 4·(RNj)3]·sin(3·ψj)
  sj,20 ← √12·(RNj)5·cos(5·ψj)
  sj,21 ← √12·(RNj)5·sin(5·ψj)
  sj,22 ← √7·[20·(RNj)6 - 30·(RNj)4 + 12·(RNj)2 - 1]
  sj,23 ← √14·[15·(RNj)6 - 20·(RNj)4 + 6·(RNj)2]·sin(2·ψj)
  sj,24 ← √14·[15·(RNj)6 - 20·(RNj)4 + 6·(RNj)2]·cos(2·ψj)
  sj,25 ← √14·[6·(RNj)6 - 5·(RNj)4]·sin(4·ψj)
  sj,26 ← √14·[6·(RNj)6 - 5·(RNj)4]·cos(4·ψj)
  sj,27 ← √14·(RNj)6·sin(6·ψj)
  sj,28 ← √14·(RNj)6·cos(6·ψj)
s

```



### 3.1.1 Конечно-элементная модель.

На рис. 3.1.1 представлена конечно-элементная модель зеркала: SPARSE MATRIX DIRECT SOLVER. Number of equations = 690537, Maximum wavefront = 8

3.2 Рассмотрены несколько теоретических случаев базирования и разгрузки ГЗ БТА:

- ГЗ БТА на торцевой подложке (торцевая разгрузка) с равномерным давлением – ось визирования в зенит (рис. 3.2.1).
- ГЗ БТА на торцевой подложке через сплошной слой резины– ось визирования в зенит (рис. 3.2.2).

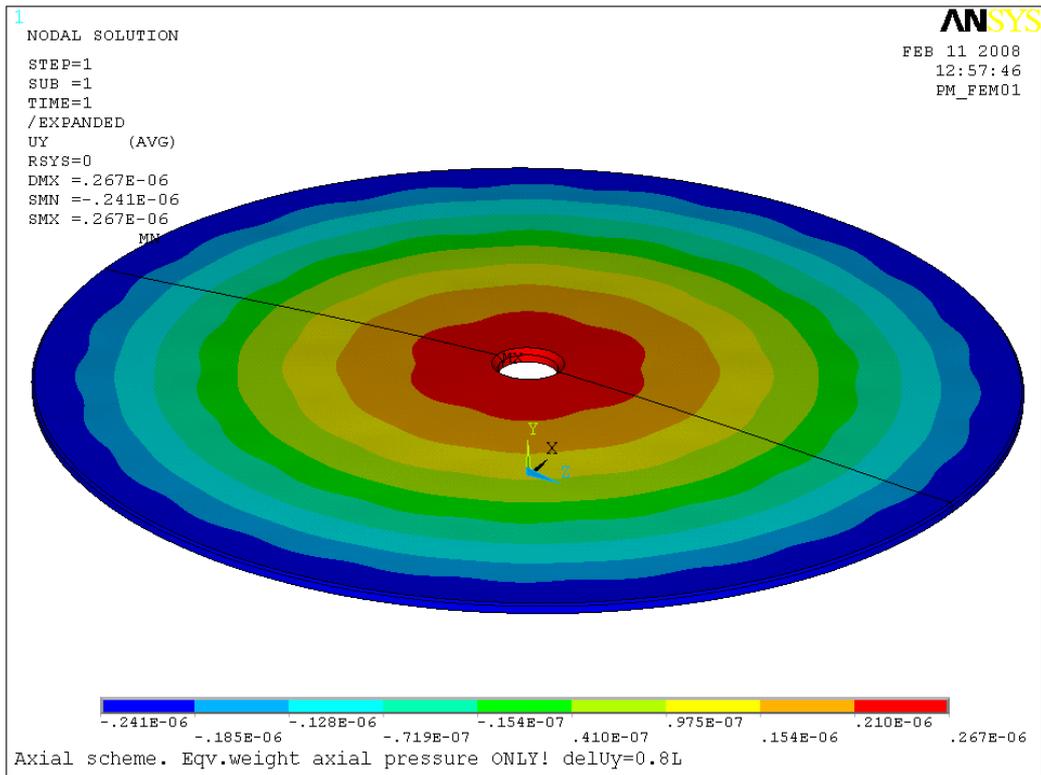


Рисунок 3.2.1 - Деформации ОП при торцевой разгрузке равномерным давлением ( $A_y=+9,81 \text{ м/с}^2$ )

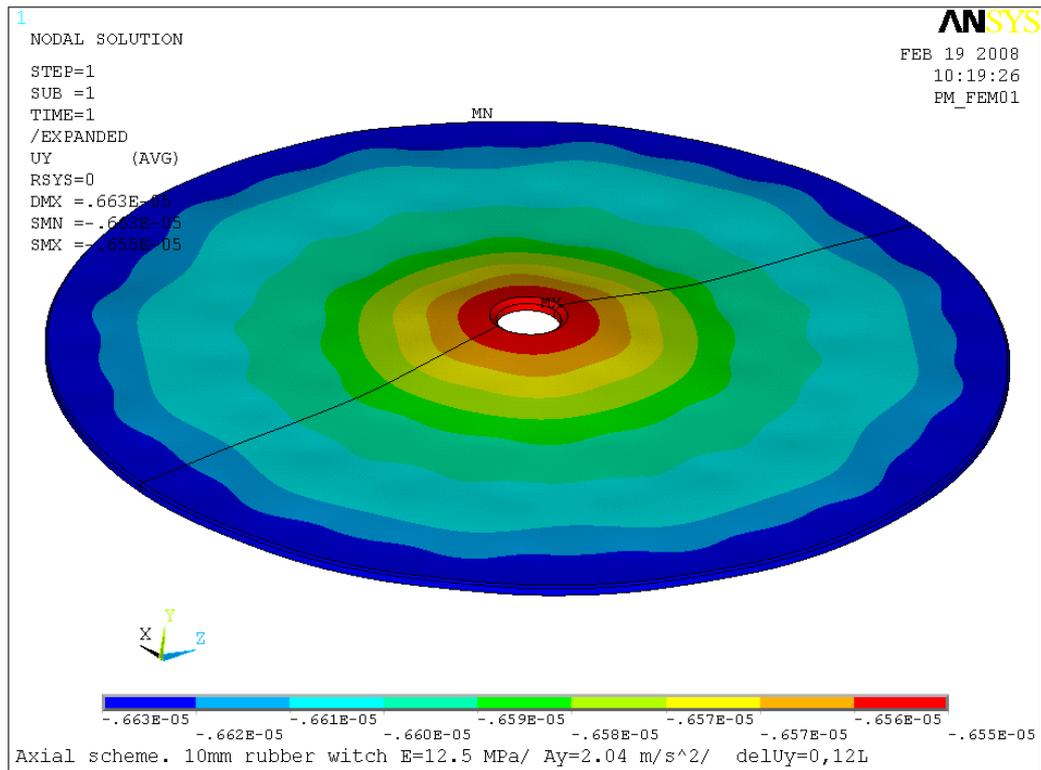


Рисунок 3.2.2 - Деформации ОП при торцевой разгрузке "на резине" ( $A_y=+9,81 \times \sin(12^\circ) \text{ м/с}^2$ )

### 3.3 Анализ ошибок оптической поверхности при обезвешивании зеркала за штатные места.

В результате данного анализа произведена численная оценка величины деформаций ОП зеркала при его разгрузке системами сил, имитирующими разгрузку в штатной оправе. Разгрузка зеркала в горизонтальной схеме контроля (ось визирования "в горизонт"). Рассмотрено совместное действие гравитации и системы из 60-ти сосредоточенных сил, приложенных в узлах модели, расположенных на поверхности выборки под размещение элементов штатной разгрузки (так, как если бы зеркало опиралось на ролики радиальной системы разгрузки с контактом между зеркалом и оправой по 60-ти локальным точкам). Равнодействующая приложенных сил равна весу зеркала.

Основным требованием при выборе узлов, к которым прикладывались разгружающие силы, являлось требование равенства нулю статического момента сил (инерционных и разгружающих) относительно суммарного ц.м. модели зеркала. Данное требование означает, что все силы, приложенные к зеркалу, не вызывают его опрокидывания (1), дополнительных реакций в опорах, фиксирующих зеркала от смещения "как жесткого целого" (2), а, следовательно, и дополнительного деформирования ОП от действия реактивных сил.

Рассмотрены два из возможных вариантов расположения опор разгрузки.

Вариант 1. Основывается на предположении, что каждая из опор радиальной разгрузки (т.е., каждая из разгружающих сил) уравнивает вес элементарного объема зеркала расположенного "вокруг" выборки (для 2, 3 и 4-го рядов – это трапеции; для 1-го – треугольники). При этом вектора разгружающих сил проходят через центры масс элементарных объемов (1), величины сил равны весам элементарных объемов (2), а суммарный статический момент сил разгрузки и инерционной силы веса зеркала относительно суммарного ц.м. зеркала равен нулю (3).

На рисунках 3.3.1÷3.3.3 представлены схема нагружения и результаты анализа ошибки ОП зеркала для данного случая размещения разгружающих сил.

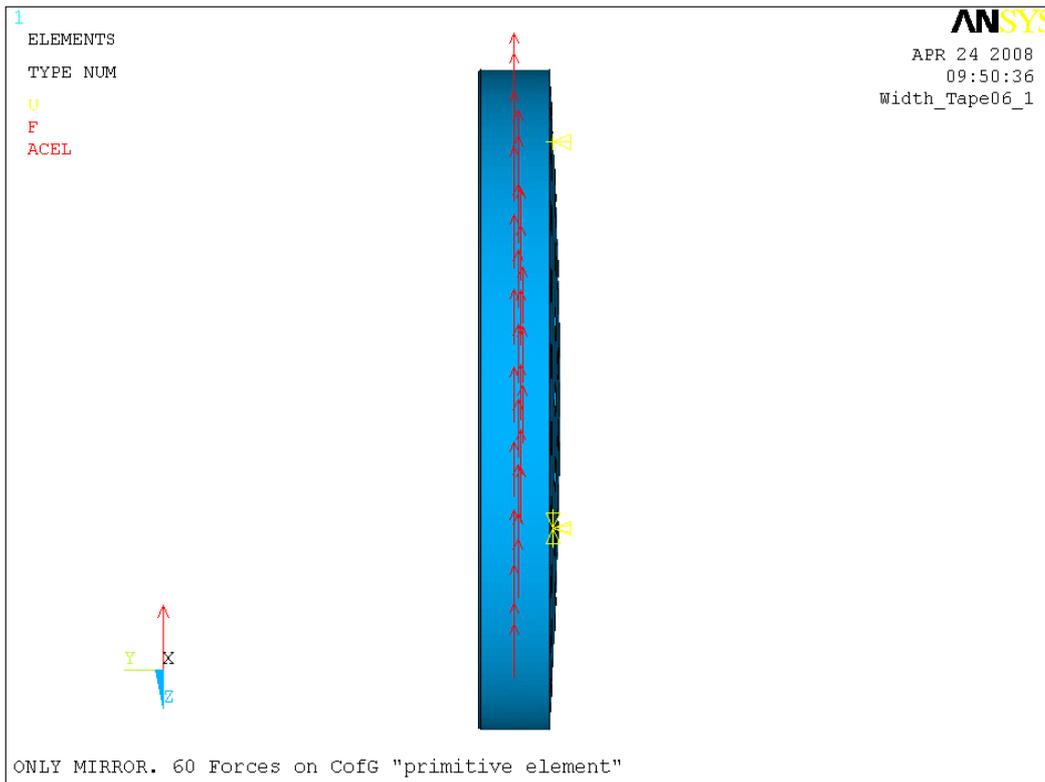


Рисунок 3.3.1 – Схема обезвешивания зеркала системой сил, приложенных по ц.м. "элементарных объемов". Желтым показано закрепление модели зеркала в данном численном анализе: ограничены по две степени свободы (в осевом и тангенциальном направлениях) в трех узлах с тыльной стороны зеркала на радиусе R2337,5 мм и углах 0°, 120° и 240°.

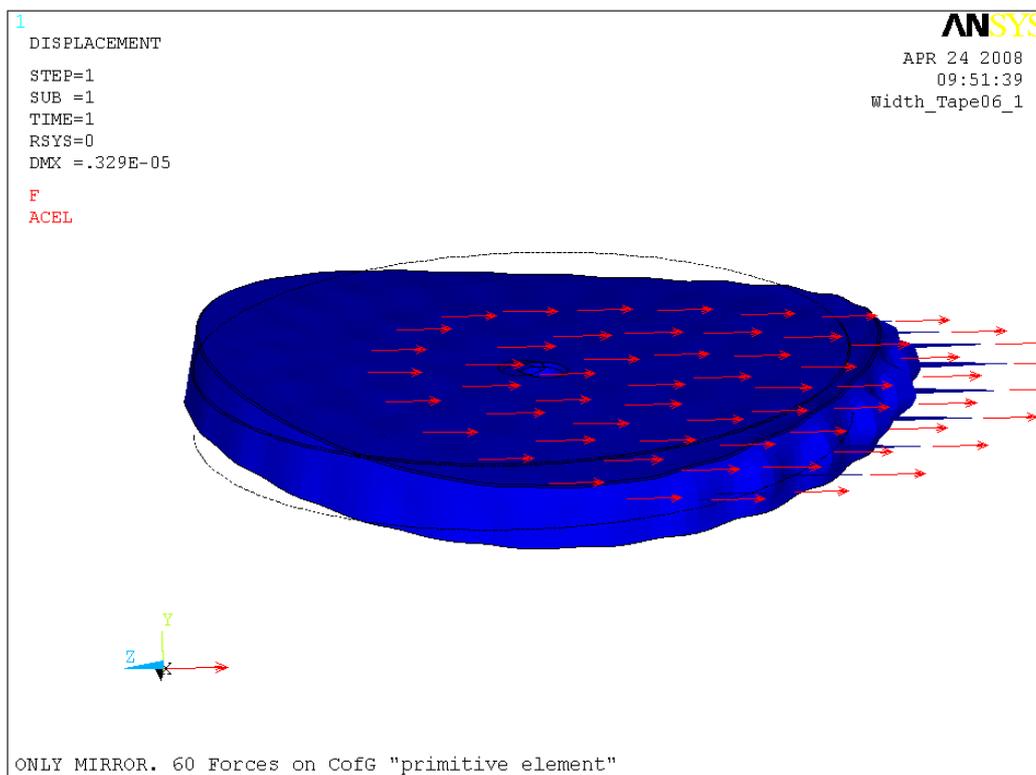
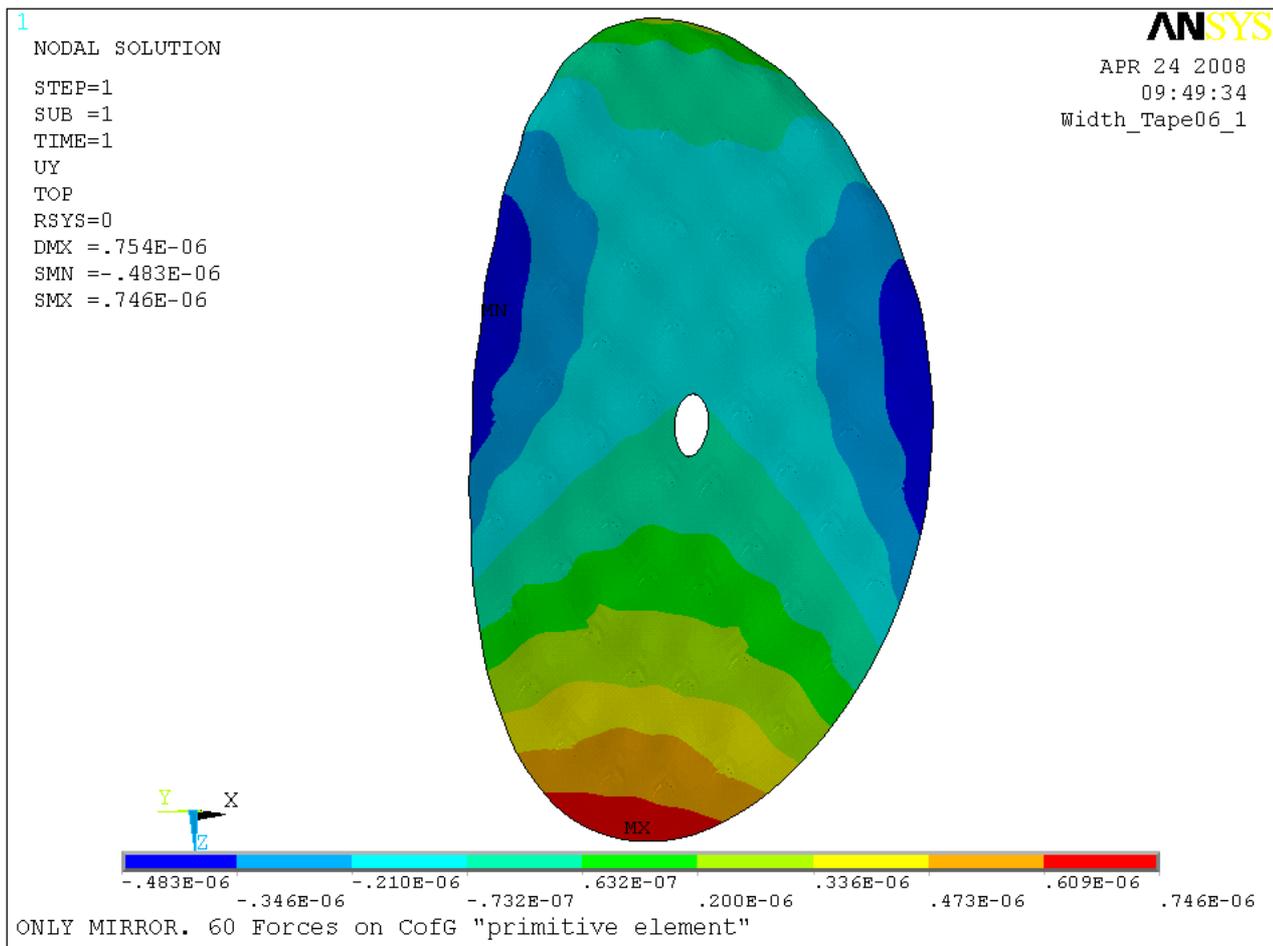


Рисунок 3.3.2 – Исходная форма (контур) и диаграмма смещений узлов КЭМ.



Ри

сунок 3.3.3 – Диаграмма смещений (метры) узлов ОП зеркала в направлении оси визирования. Горизонтальная схема разгрузки. Имитация разгрузки в штатной оправе. Размещение разгружающих сил по схеме уравнивания "элементарных объемов". Размах деформаций  $PV=1,23$  мкм; среднеквадратичная ошибка (за исключением первых 4-х членов в полиномах Цернике)  $RMS=180$  нм ( $0,285\lambda$ )

Вариант 2. По данному варианту размещения разгружающих сил их вектора (все 60) лежат в плоскости суммарного ц.м. зеркала, а величина каждой силы составляет  $1/60$  веса зеркала.

Результаты анализа по данному варианту нагружения (при том же закреплении) представлены на рисунках 3.3.4÷3.3.6.

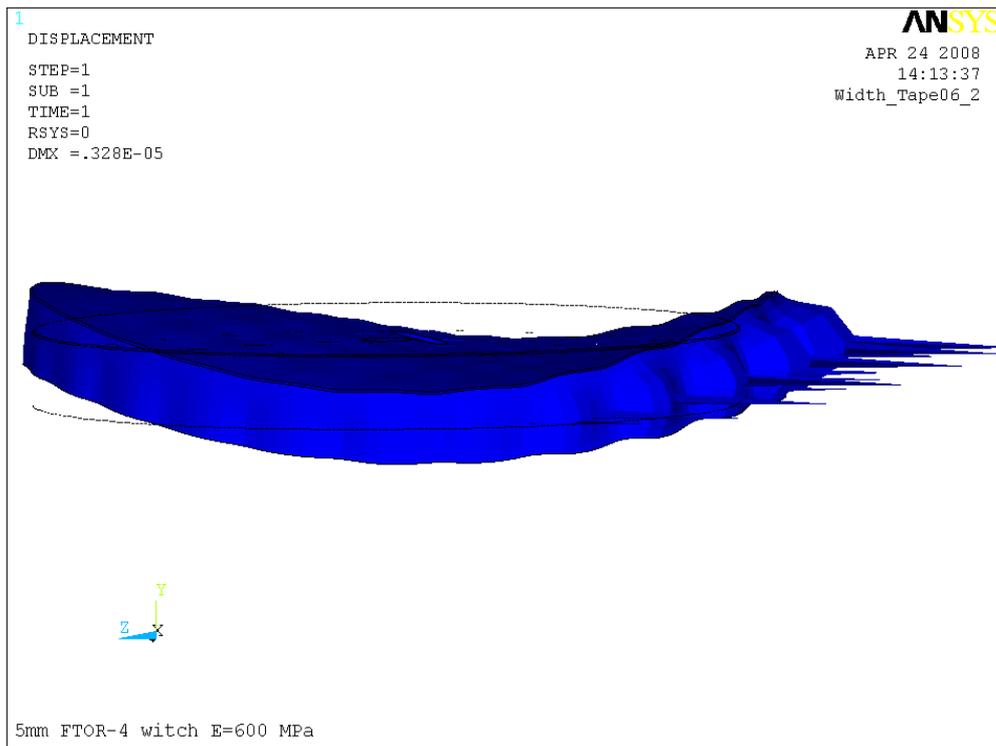


Рисунок 3.3.4 – Исходная форма (контур) и диаграмма смещений узлов КЭМ.

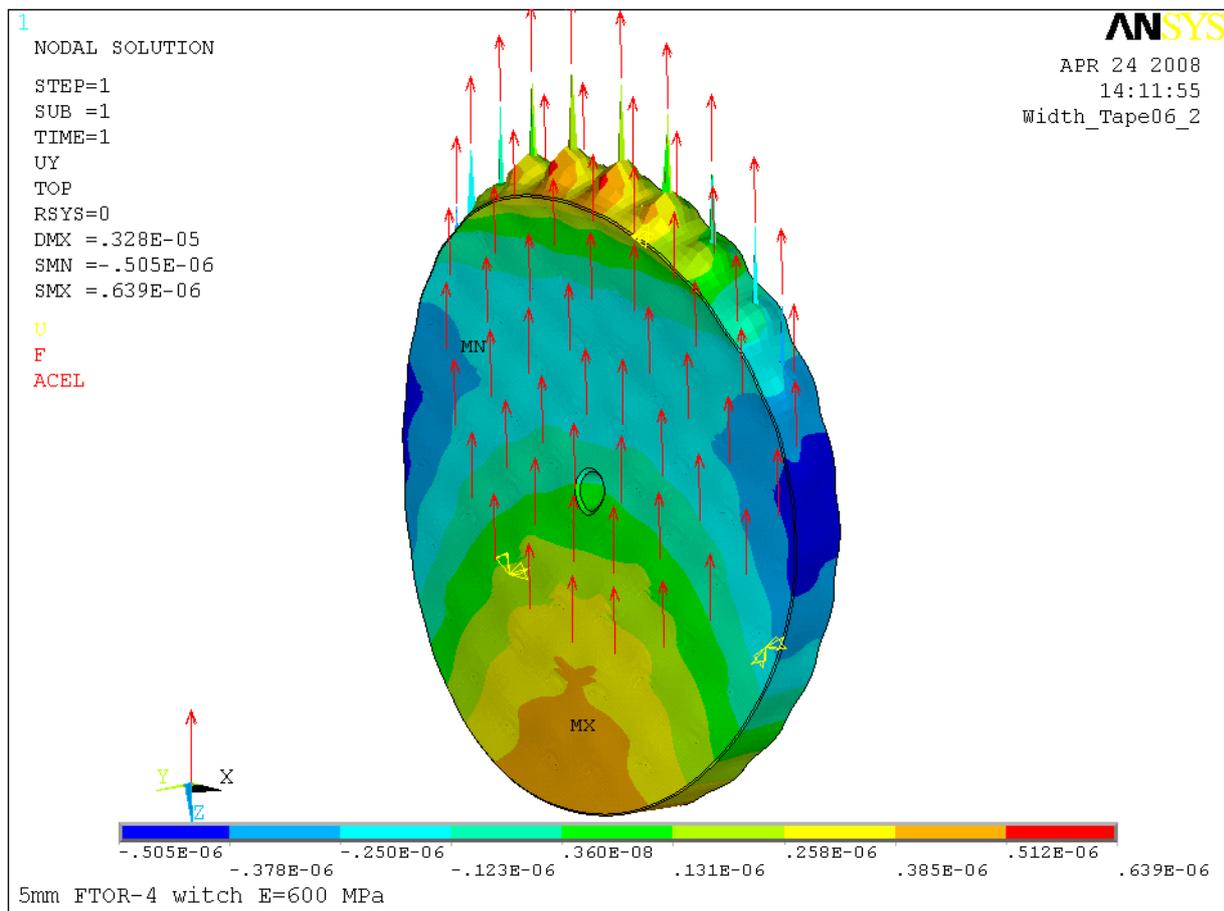


Рисунок 3.3.5 – Диаграмма смещений (метры) узлов модели зеркала, наложенная на его деформированную форму

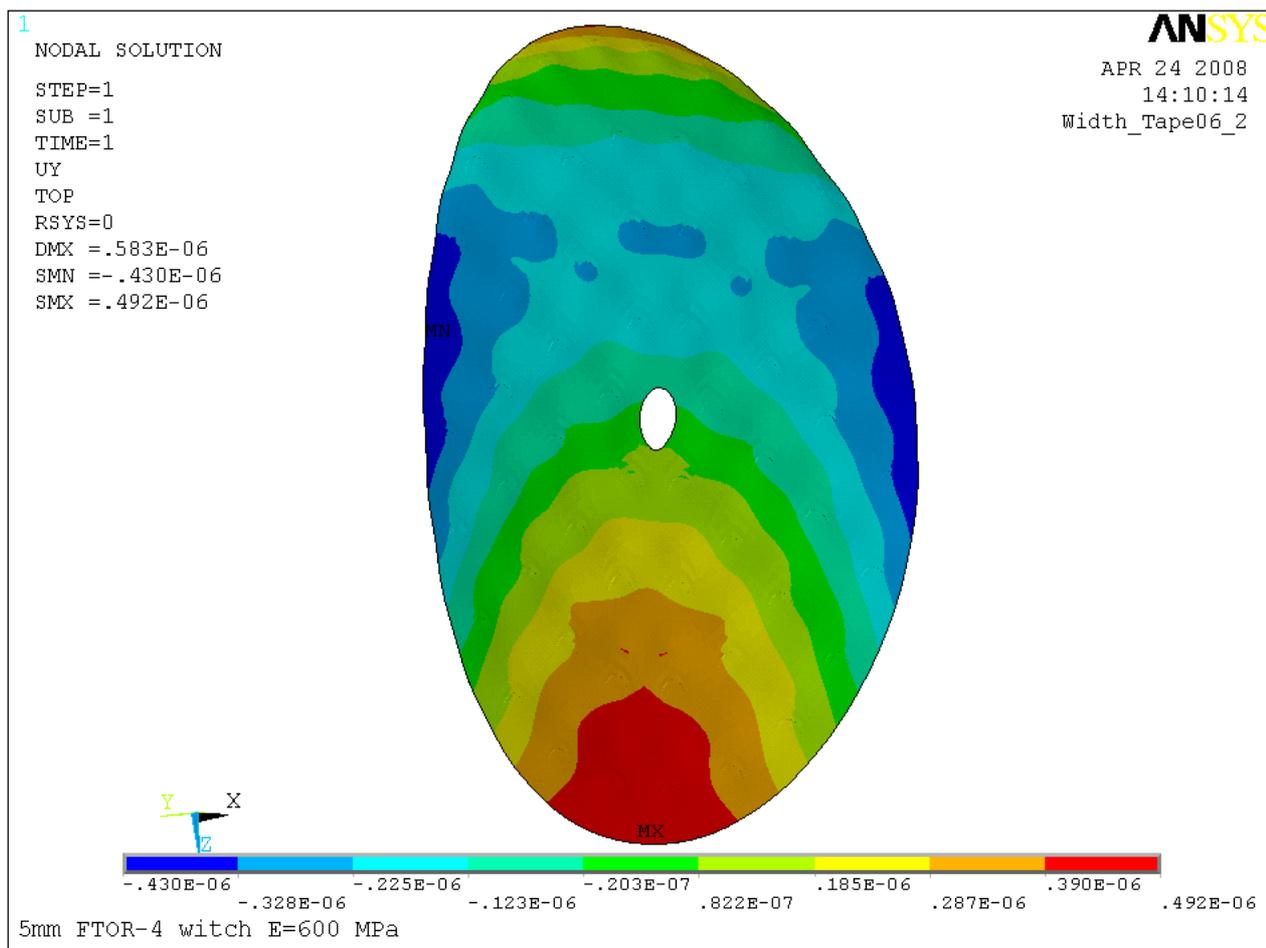


Рисунок 3.3.6 – Диаграмма смещений (метры) узлов ОП зеркала в направлении оси визирования. Горизонтальная схема разгрузки. Имитация разгрузки в штатной оправе. Размещение разгружающих сил по схеме их приложения в плоскости суммарного ц.м. зеркала. Размах деформаций  $PV=0,92$  мкм; среднеквадратичная ошибка (за исключением первых 4-х членов в полиномах Цернике)  $RMS=177$  нм ( $0,28\lambda$ )

3.4 Разгрузка зеркала в вертикальной схеме контроля (осью визирования "в зенит").

На рисунках 3.4.1, 3.4.2 представлены схема и результаты расчета деформаций ОП зеркала при его обезвешивании осью визирования "в зенит". В данном анализе уравновешивающие силы прикладывались группами по кромкам выборок с тыльной стороны зеркала. Равнодействующая каждой группы сил принята равной  $1/60$  веса зеркала.

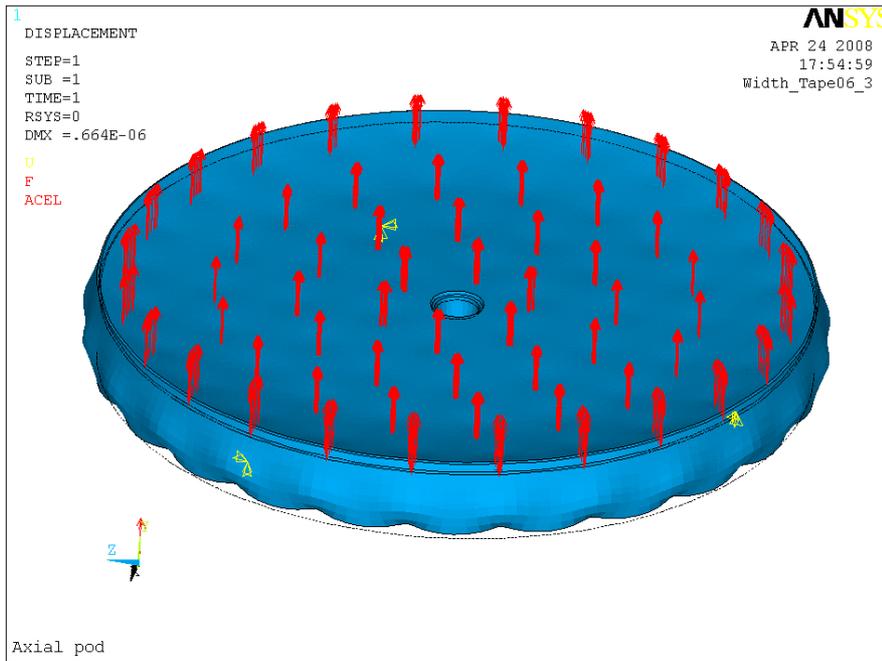


Рисунок 3.4.1 – Исходная (контур) и деформированная форма зеркала, схема его нагружения и закрепления в расчете обезвешивания зеркала осью визирования вертикально.

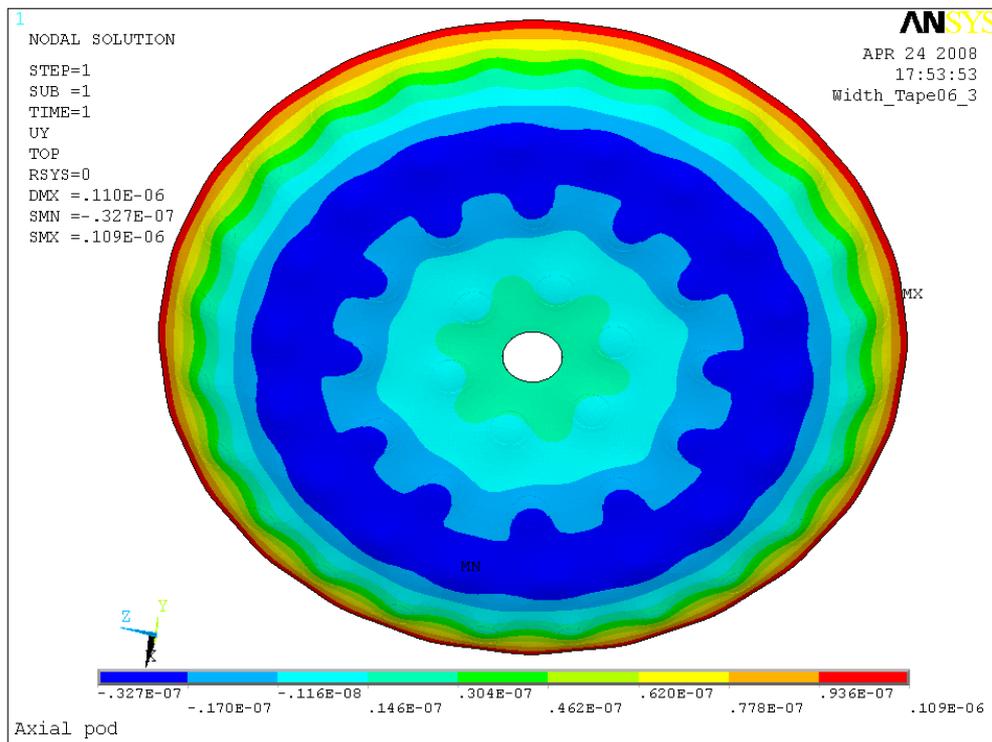


Рисунок 3.4.2 – Диаграмма смещений (метры) узлов ОП зеркала в направлении оси визирования. Торцевая схема разгрузки. Имитация разгрузки в штатной оправе.

Размах деформаций PV=0,142 мкм

#### 4. ДЕФОРМАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА БТА ПРИ НЕКОТОРЫХ СХЕМАХ ЕГО РАДИАЛЬНОЙ И ТОРЦЕВОЙ РАЗГРУЗКИ.

1. Зеркало на 60-ти радиальных разгрузках осью визирования в горизонт. Приложение нагрузок - точечное в 60 узлов модели по центрам масс "элементарных объемов".

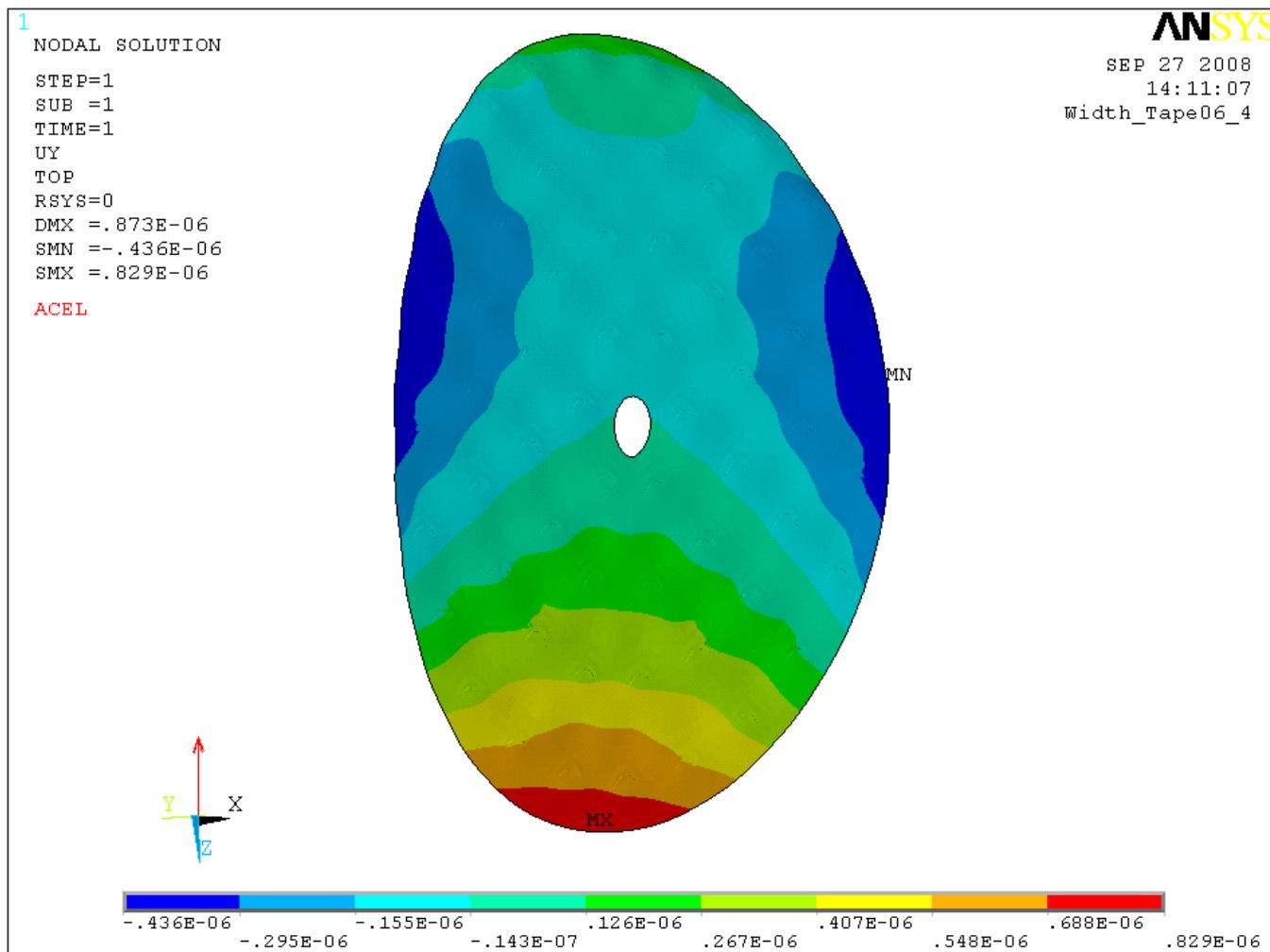


Рисунок 4.1,а – Смещение узлов ОП в направлении оси визирования ( $u_y$ , м). Осью визирования (Y) - в горизонт, на 60-ти радиальных разгрузках.

# Карта волнового фронта

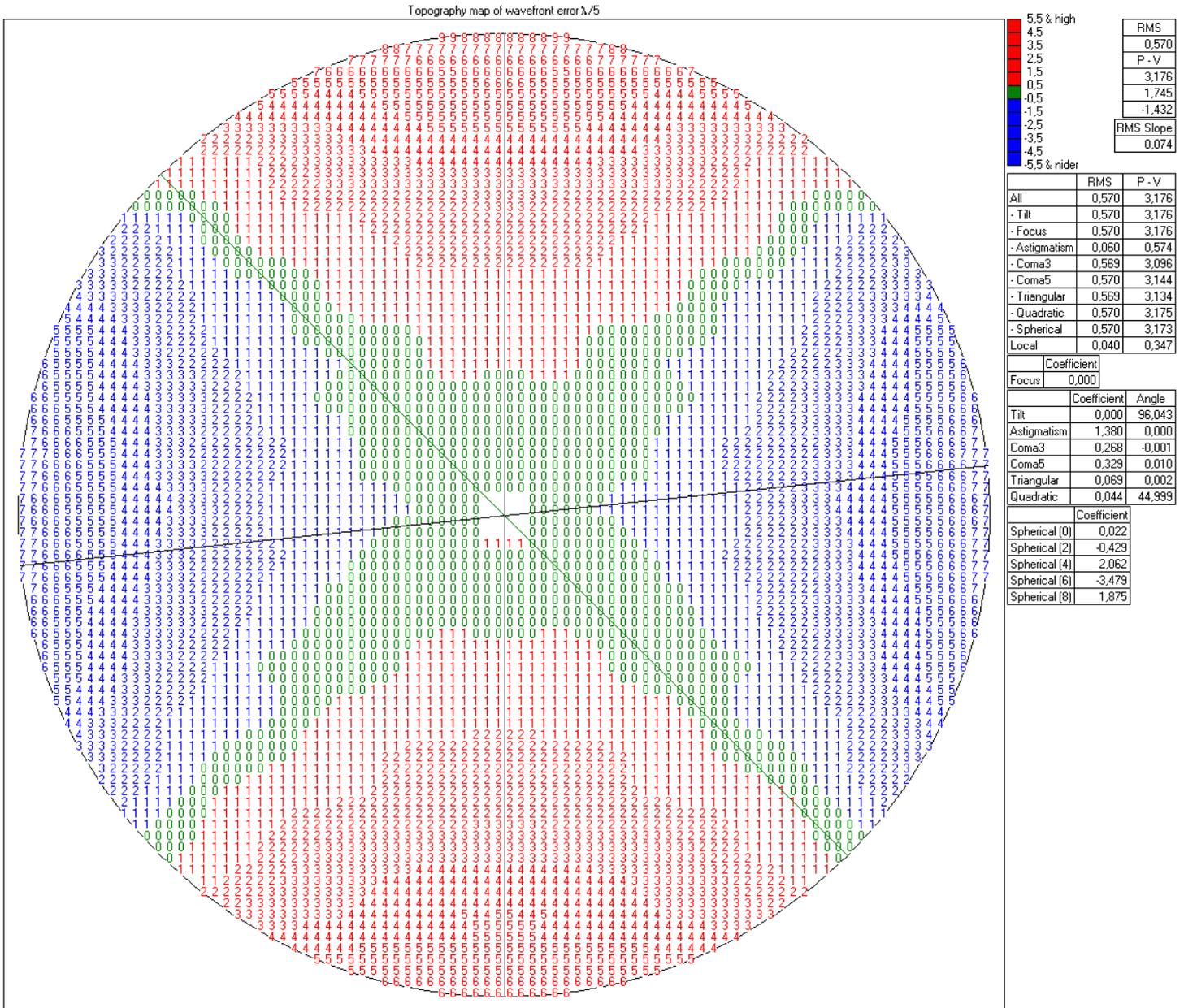


Рисунок 4.1,б – Смещение узлов ОП в направлении оси визирования ( $u_y, \lambda$ ). Осью визирования (Y) - в горизонт, на 60-ти радиальных разгрузках.

4.2. Зеркало на 60-ти радиальных и 60-ти торцевых разгрузках осью визирования  $12^\circ$  к горизонту. Приложение нагрузок: радиальных - точечное в 60 узлов модели по центрам масс "элементарных объемов", торцевых – распределенное в 60-ти местах по контурам выборок под рабочие элементы торцевой разгрузки.

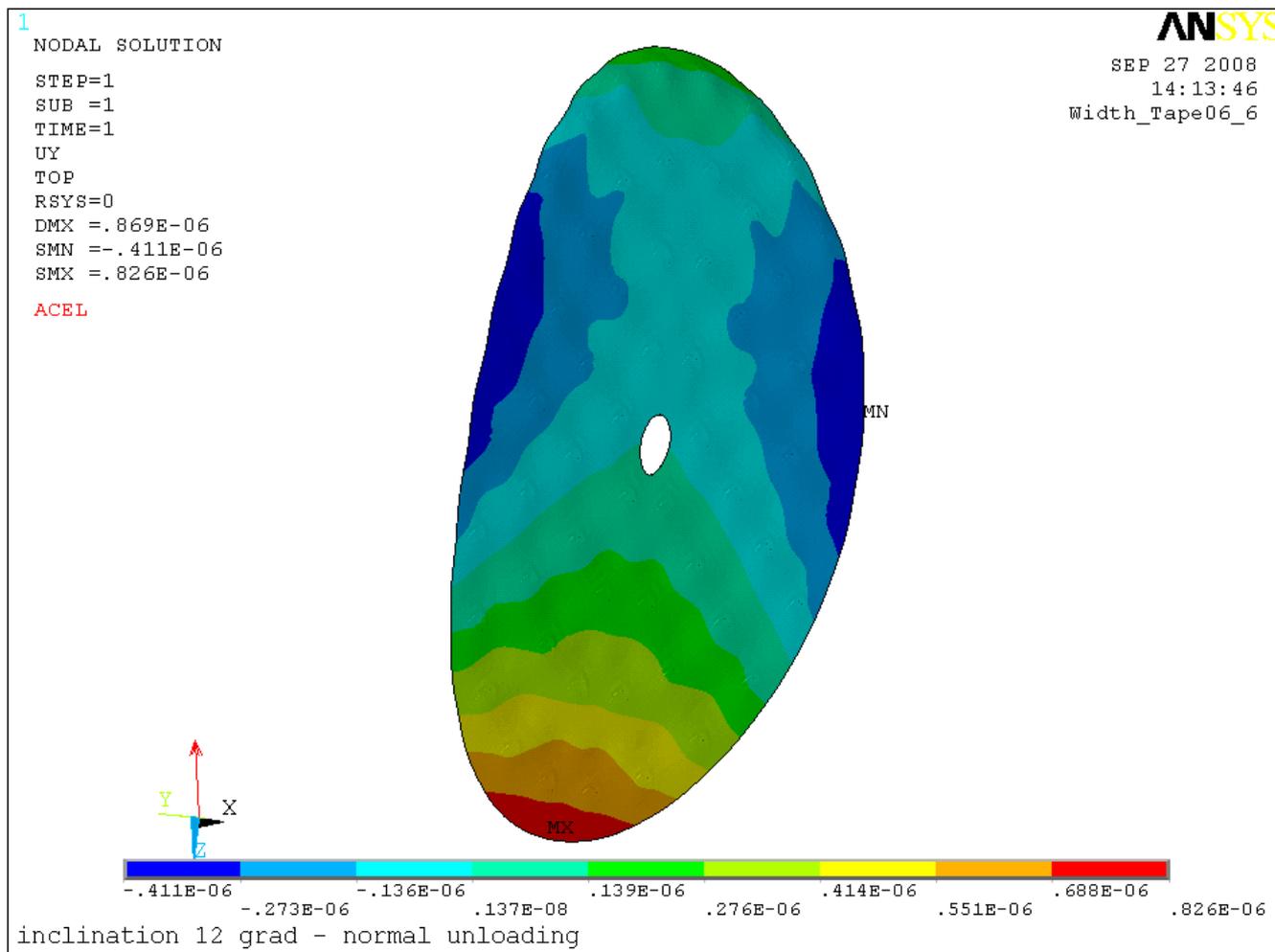


Рисунок 4.2,а – Смещение узлов ОП в направлении оси визирования ( $u$ , м). Осью визирования (Y) -  $12^\circ$  к горизонту, на 60-ти радиальных и 60-ти торцевых разгрузках

# Карта волнового фронта

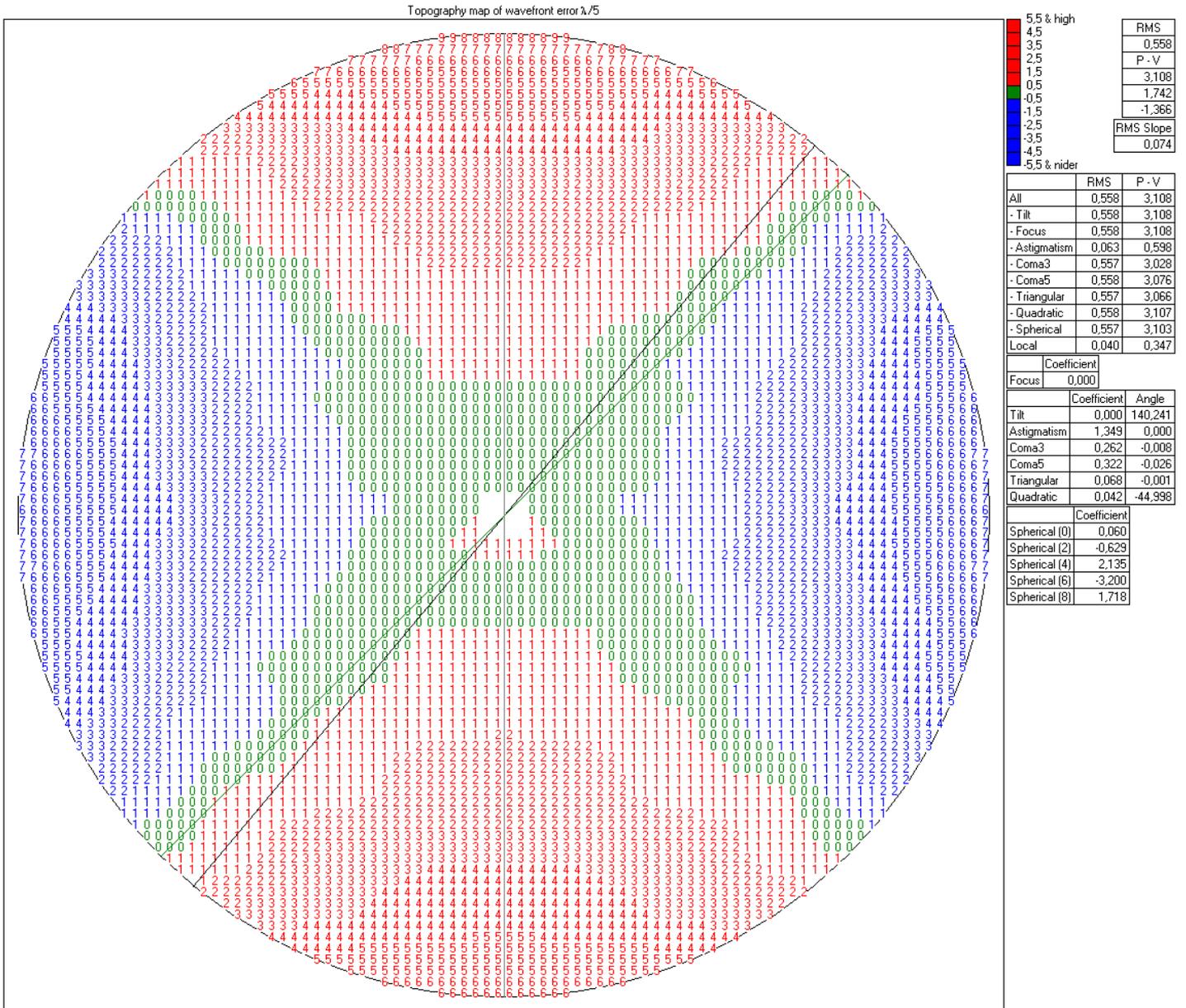


Рисунок 4.2,б – Смещение узлов ОП в направлении оси визирования ( $\mu$ ,  $\lambda$ ). Осью визирования (Y) -  $12^\circ$  к горизонту, на 60-ти радиальных и 60-ти торцевых разгрузках

ГЗ БТА на штатной радиальной разгрузке в положении оптического контроля (ось зеркала  $12^\circ$  к горизонту) при торцевом опирании на 3 или 6 жестких точек расположенных на R 2337.5 мм.

4.3.1 Зеркало на 60-ти радиальных разгрузках и 3-х жестких торцевых точках осью визирования  $12^\circ$  к горизонту. Приложение нагрузок: радиальных - точечное в 60 узлов модели по центрам масс "элементарных объемов". Торцевое опирание – на три жесткие точки на радиусе R2337,5 м с разрешенным проскальзыванием.

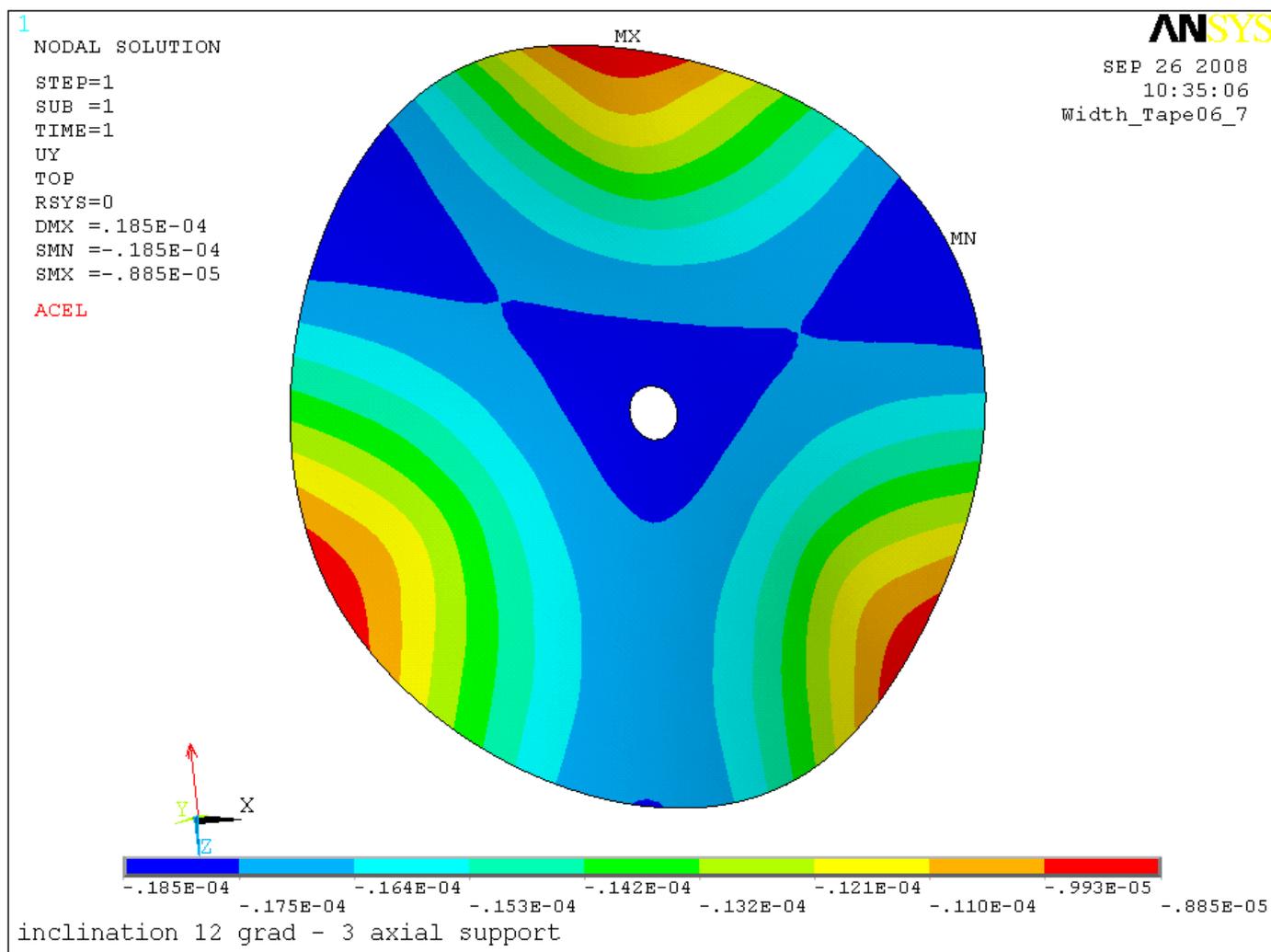


Рисунок 4.3,а – Смещение узлов ОП в направлении оси визирования (uy, м). Осью визирования (Y) -  $12^\circ$  к горизонту, на 60-ти радиальных разгрузках и 3-х жестких торцевых опорах

# Карта волнового фронта

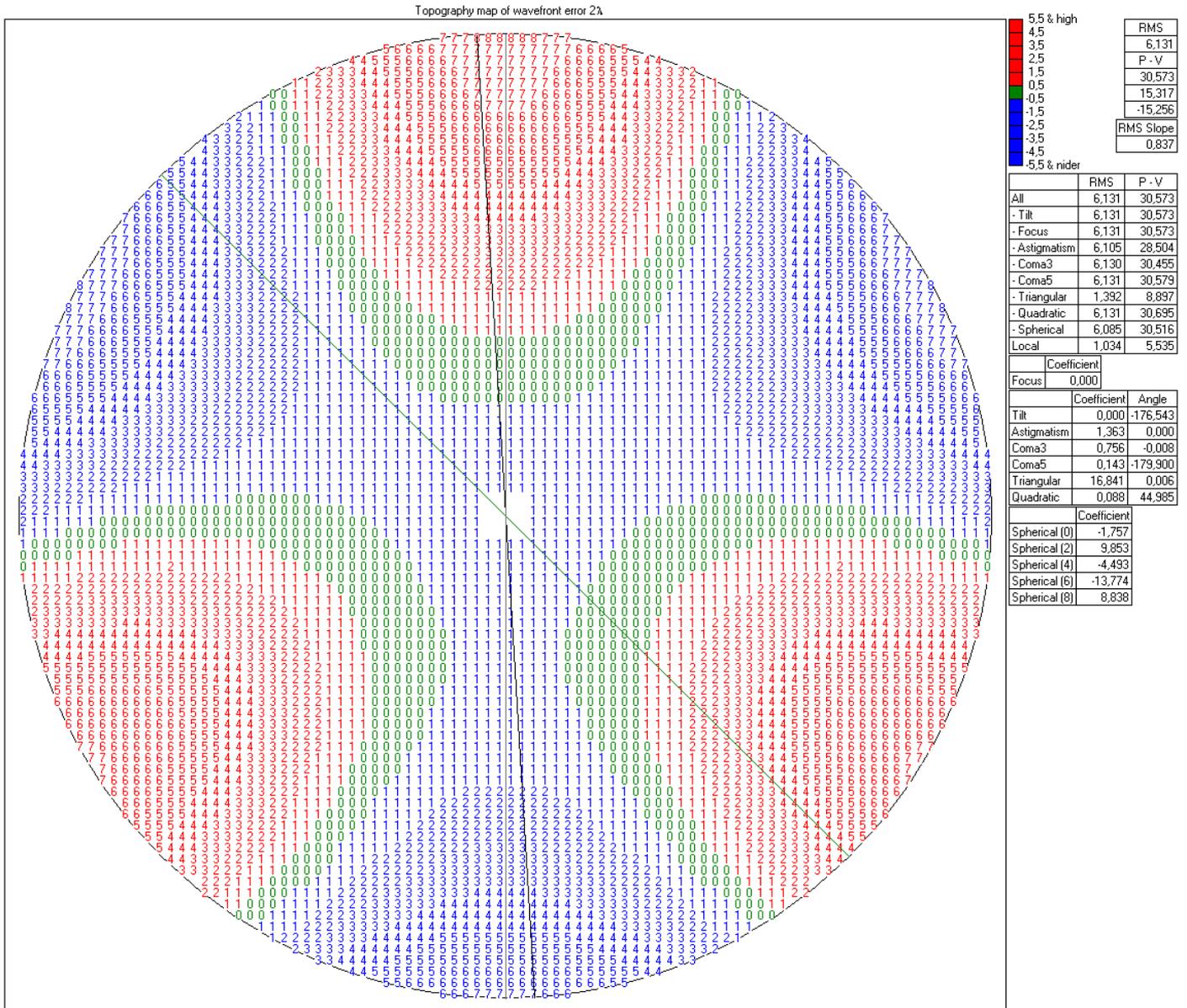


Рисунок 4.3,б – Смещение узлов ОП в направлении оси визирования ( $u_y, \lambda$ ). Осью визирования (Y) -  $12^\circ$  к горизонту, на 60-ти радиальных разгрузках и 3-х жестких торцевых опорах

4.3.2 Зеркало на 60-ти радиальных разгрузках и 6-ти жестких торцевых точках осью визирования  $12^\circ$  к горизонту. Приложение нагрузок: радиальных - точечное в 60 узлов модели по центрам масс "элементарных объемов". Торцевое опирание – на три жесткие точки на радиусе R2337,5 м с разрешенным проскальзыванием.

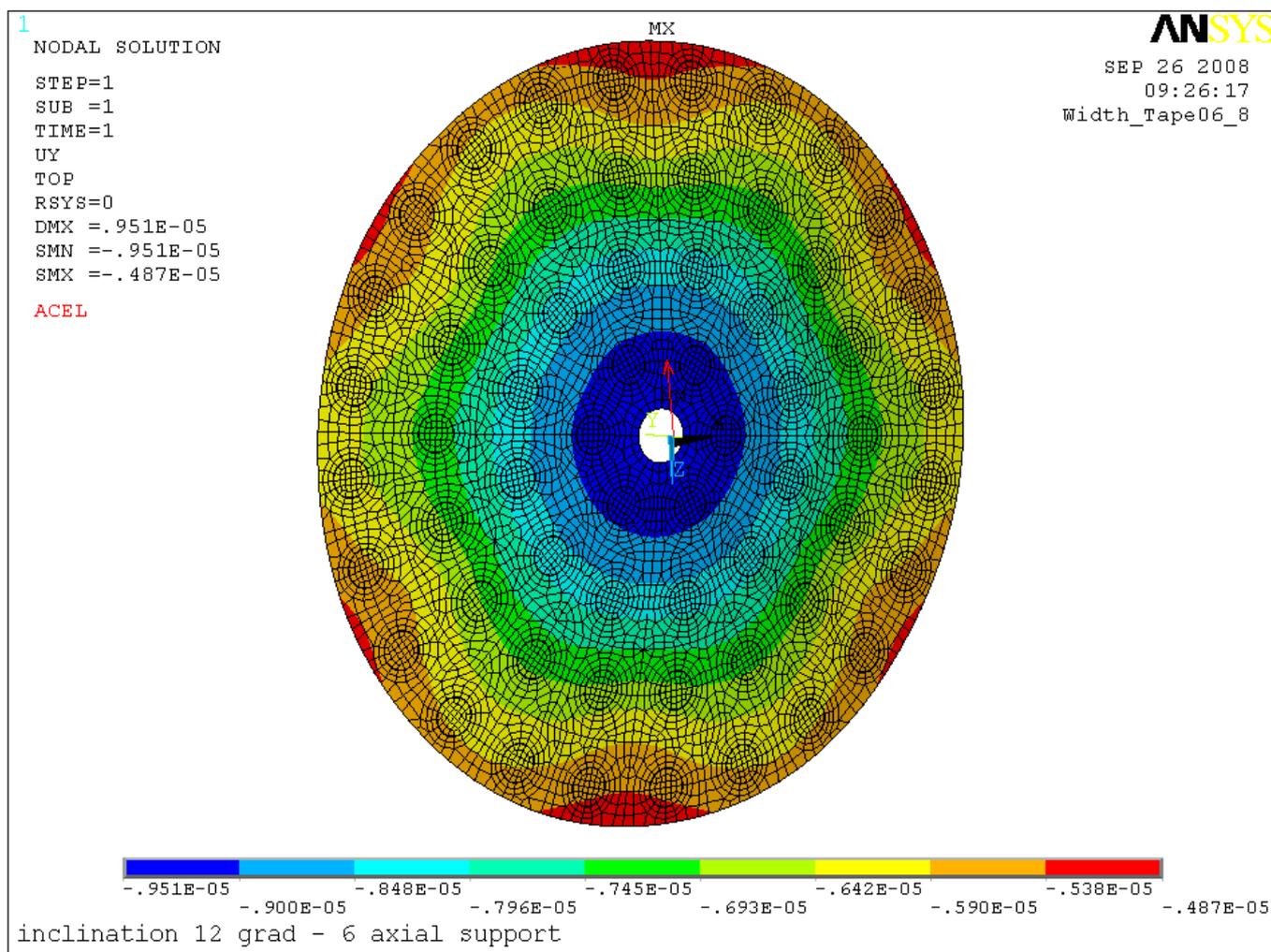


Рисунок 4.4,а – Смещение узлов ОП в направлении оси визирования (uy, м). Осью визирования (Y) -  $12^\circ$  к горизонту, на 60-ти радиальных разгрузках и 6-ти жестких торцевых опорах

# Карта волнового фронта

Без выделения сферы

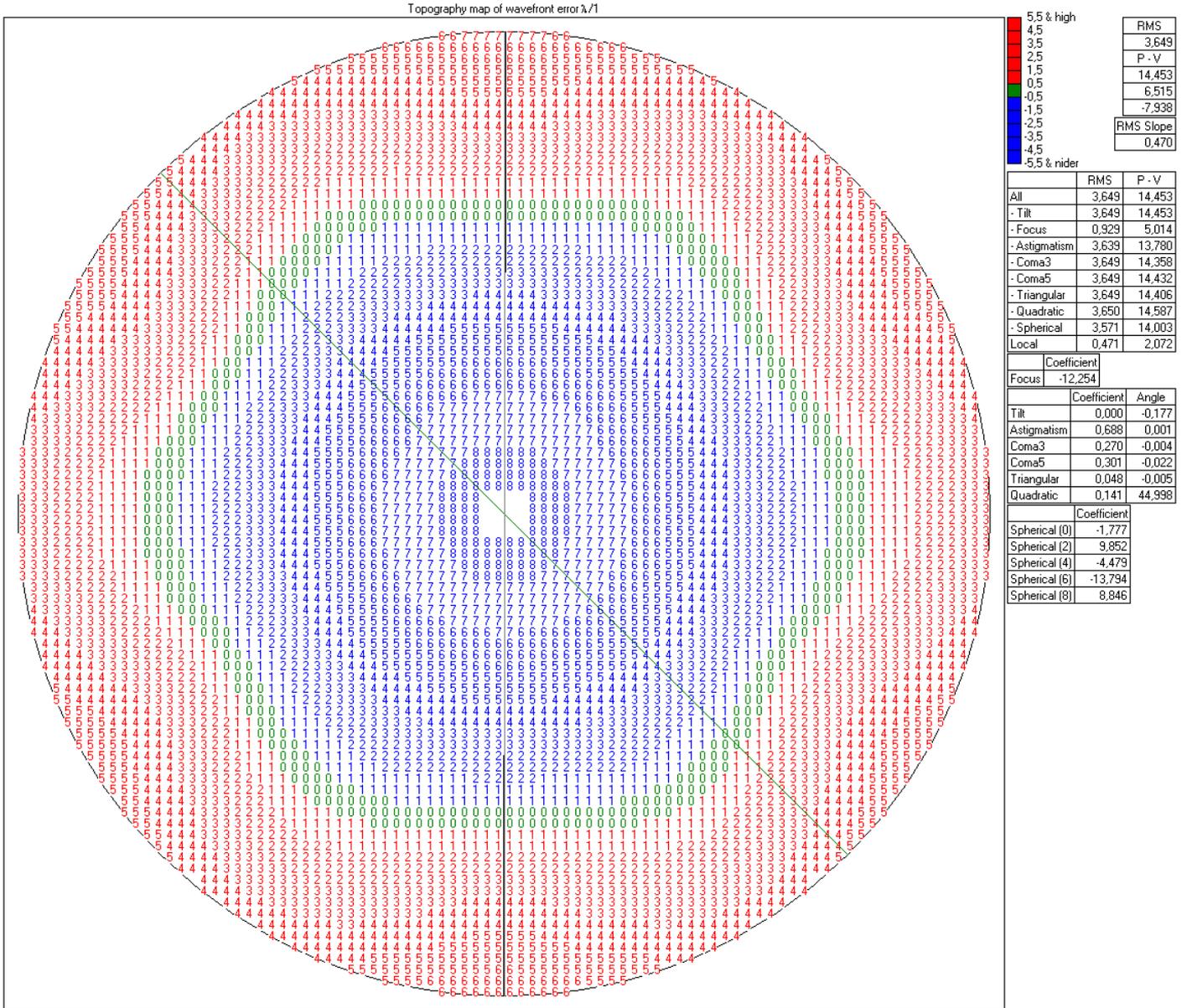


Рисунок 4.4,б – Смещение узлов ОП в направлении оси визирования ( $\mu$ ,  $\lambda$ ). Осью визирования (Y) -  $12^\circ$  к горизонту, на 60-ти радиальных разгрузках и 6-ти жестких торцевых опорах

# Карта волнового фронта

## С выделением сферы

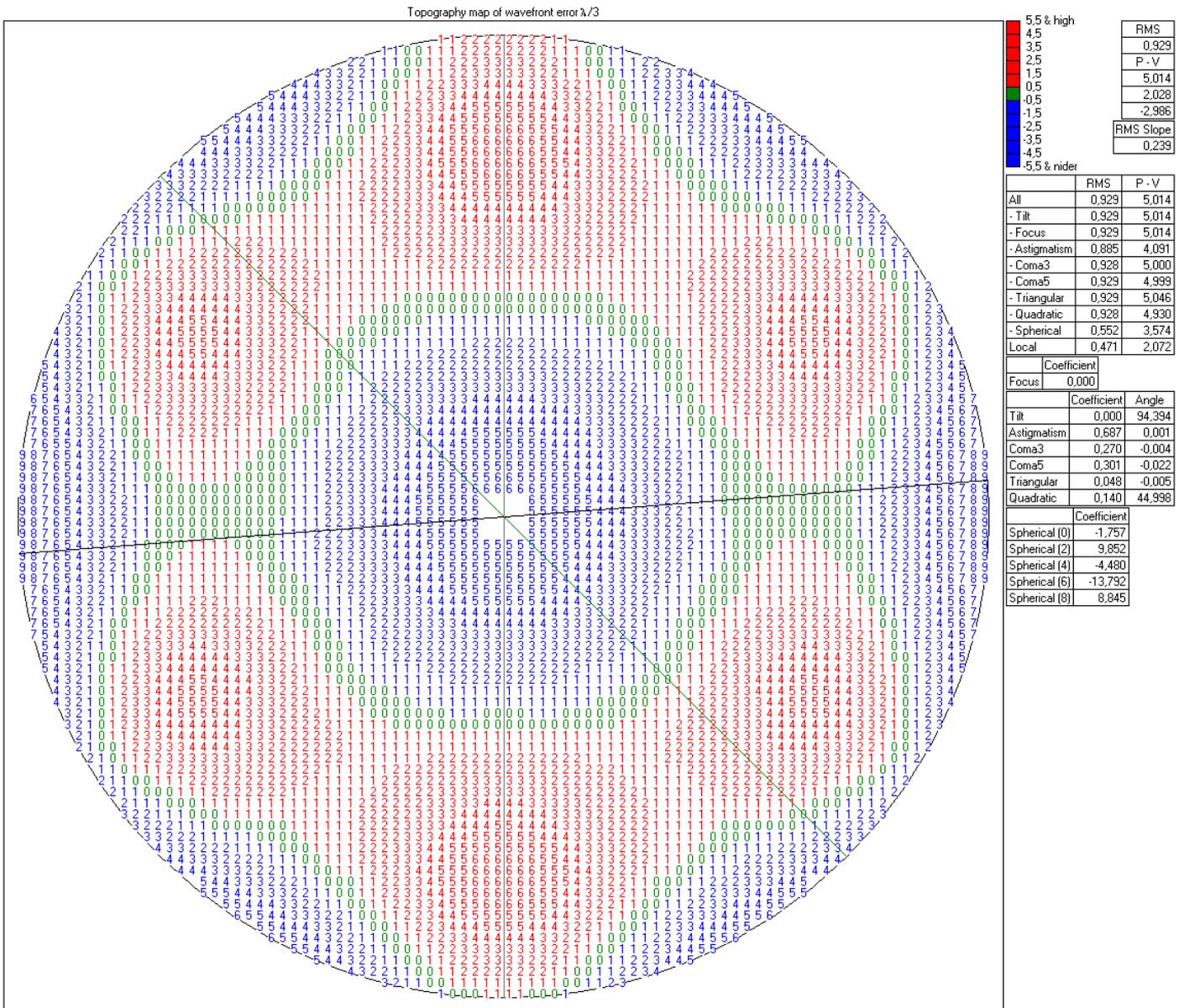


Рисунок 4.4,в – Смещение узлов ОП в направлении оси визирования ( $\mu$ ,  $\lambda$ ). Осью визирования (Y) -  $12^\circ$  к горизонту, на 60-ти радиальных разгрузках и 6-ти жестких торцевых опорах

ГЗ БТА установленное на монолитной чугунной подложке с упругими торцевыми прокладками (ось зеркала  $12^\circ$  к горизонту). Подложка жестко закреплена на столе станка КУ-168 в центральной зоне 6 болтами М36 на  $R=360$  мм и 8 болтами R36 на  $R=2500$ мм ГЗ БТА в радиальном направлении поддерживается лентой. С углом обхвата цилиндрической боковой поверхности зеркала  $90^\circ$  и  $84^\circ$ . Ширина ленты 480мм, толщина 2мм. Определить величину и характер деформации сферической поверхности подложки при заклоне стола станка на  $12^\circ$  к горизонту.

#### 4.4. Деформация сферической поверхности чугунной подложки.

Геометрия подложки – по черт. файл " Подложка 6-и м зеркала\_1.dwg".

Физико-механические характеристики материала:

$E_X = 0.11000E+12$  Па – модуль упругости  
 $\nu_{XY} = 0.28000$  - коэффициент Пуассона  
 $\alpha_{PX} = 0.11000E-04$   $1/^\circ\text{C}$  - КЛТР  
 $DENS = 7100.0$   $\text{кг/м}^3$  - плотность

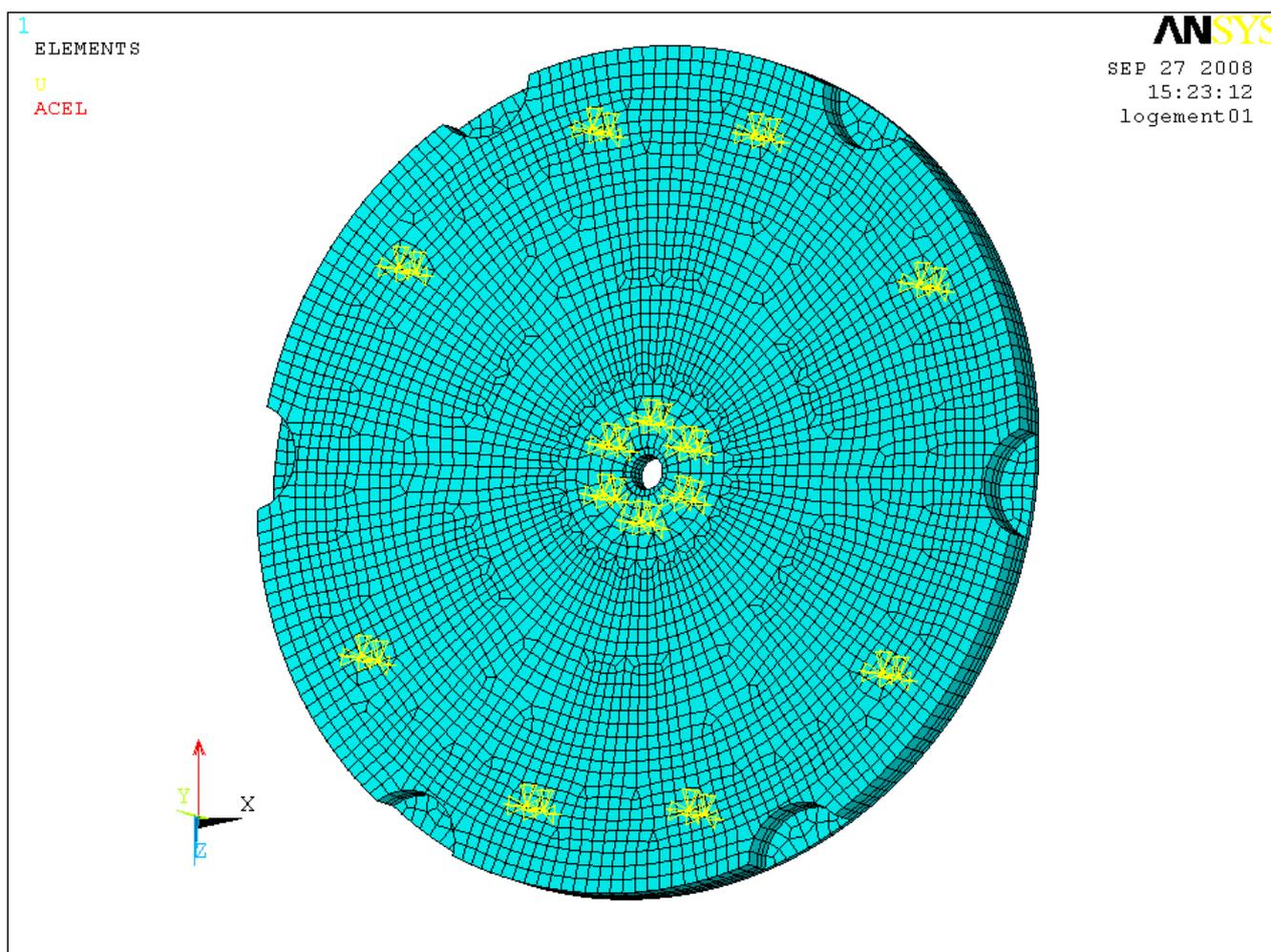


Рисунок 4.5 – Конечно-элементная модель подложки. Геометрия, сеточное разбиение, закрепление, нагружение. Центральная ось подложки (Y) -  $12^\circ$  к горизонту.

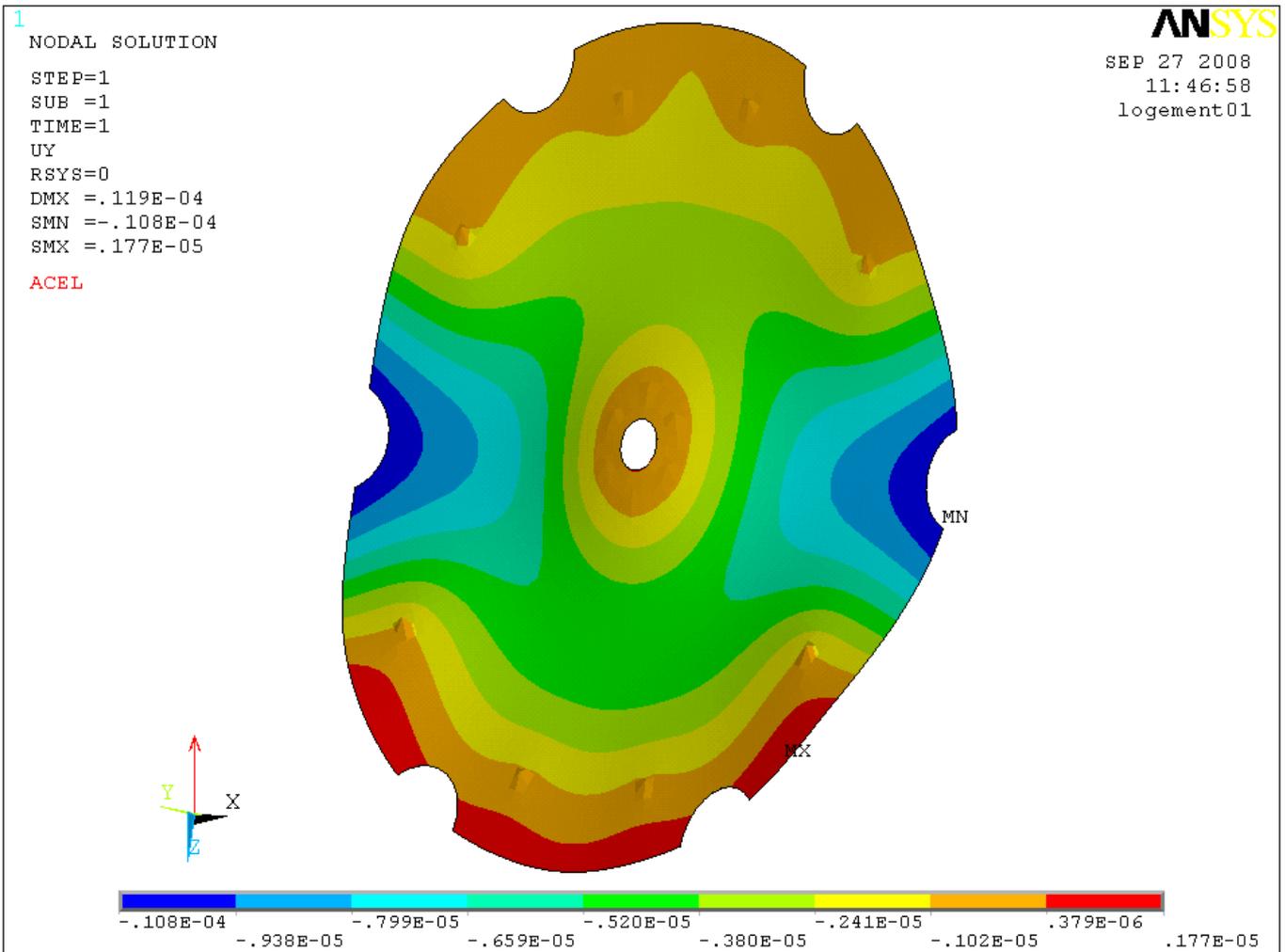


Рисунок 4.6,а – Смещение ( $u_y$ , м) узлов сферической поверхности подложки при заклоне стола станка на  $12^\circ$  к горизонту и ЖЕСТКОМ ОПИРАНИИ ПОДЛОЖКИ ТОЛЬКО(!) В ПЕРЕЧИСЛЕННЫХ ВЫШЕ МЕСТАХ

## Карта волнового фронта

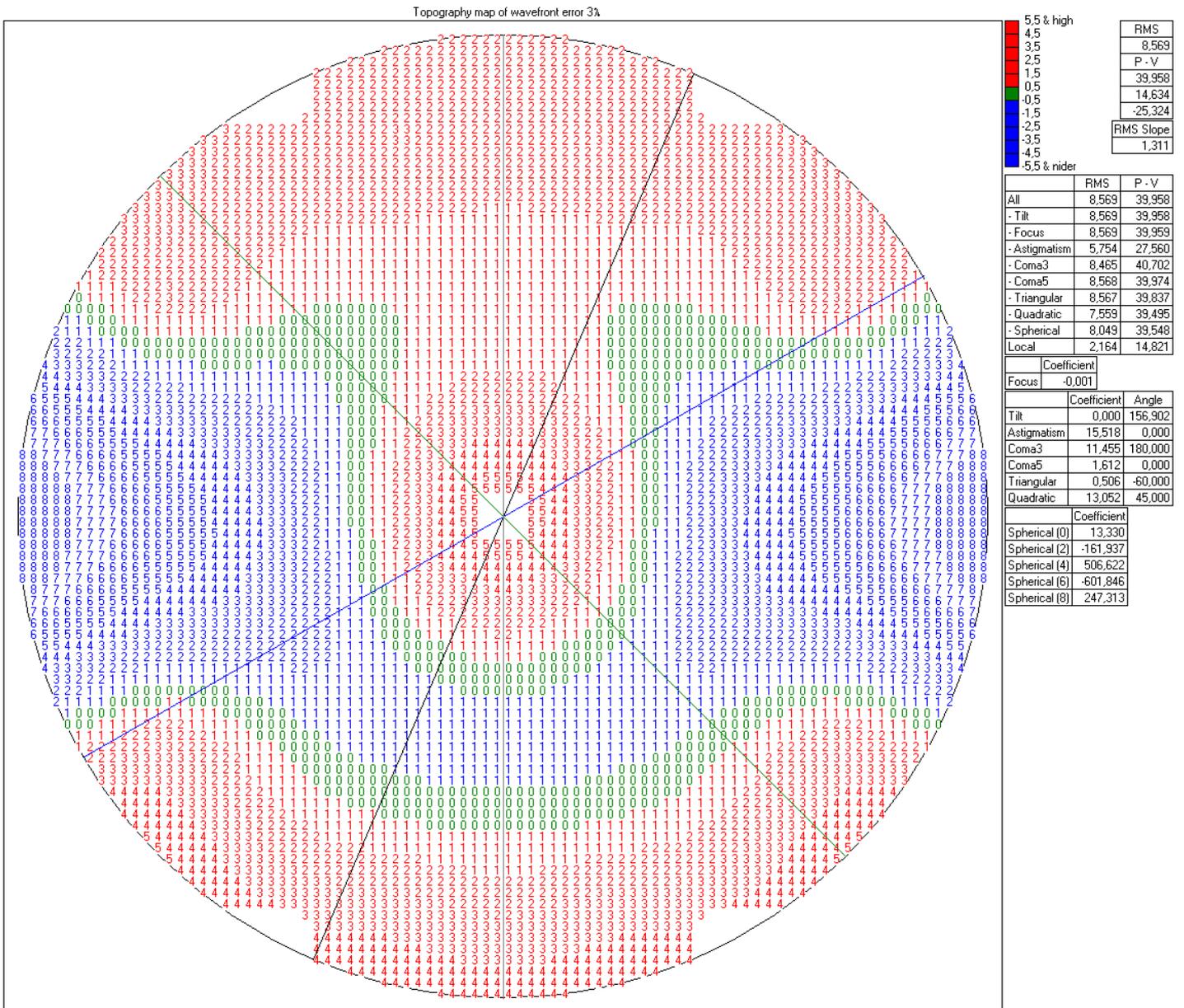


Рисунок 4.6,б – Смещение ( $u$ ,  $\lambda$ ) узлов сферической поверхности подложки при законе стола станка на  $12^\circ$  к горизонту и ЖЕСТКОМ ОПИРАНИИ ПОДЛОЖКИ ТОЛЬКО(!) В ПЕРЕЧИСЛЕННЫХ В ВЫШЕ МЕСТАХ

4.5. Зеркало на ленте и ложементе. Полуохват ленты -  $90^\circ$ , крепление ложемента – по рис. 5 (в соответствии с п.1.2 вашего письма). Наклон оси визирования зеркала  $12^\circ$  к горизонту.

Решение с учетом "проскальзывания" вдоль ложемента (без корректирующего сдвига):

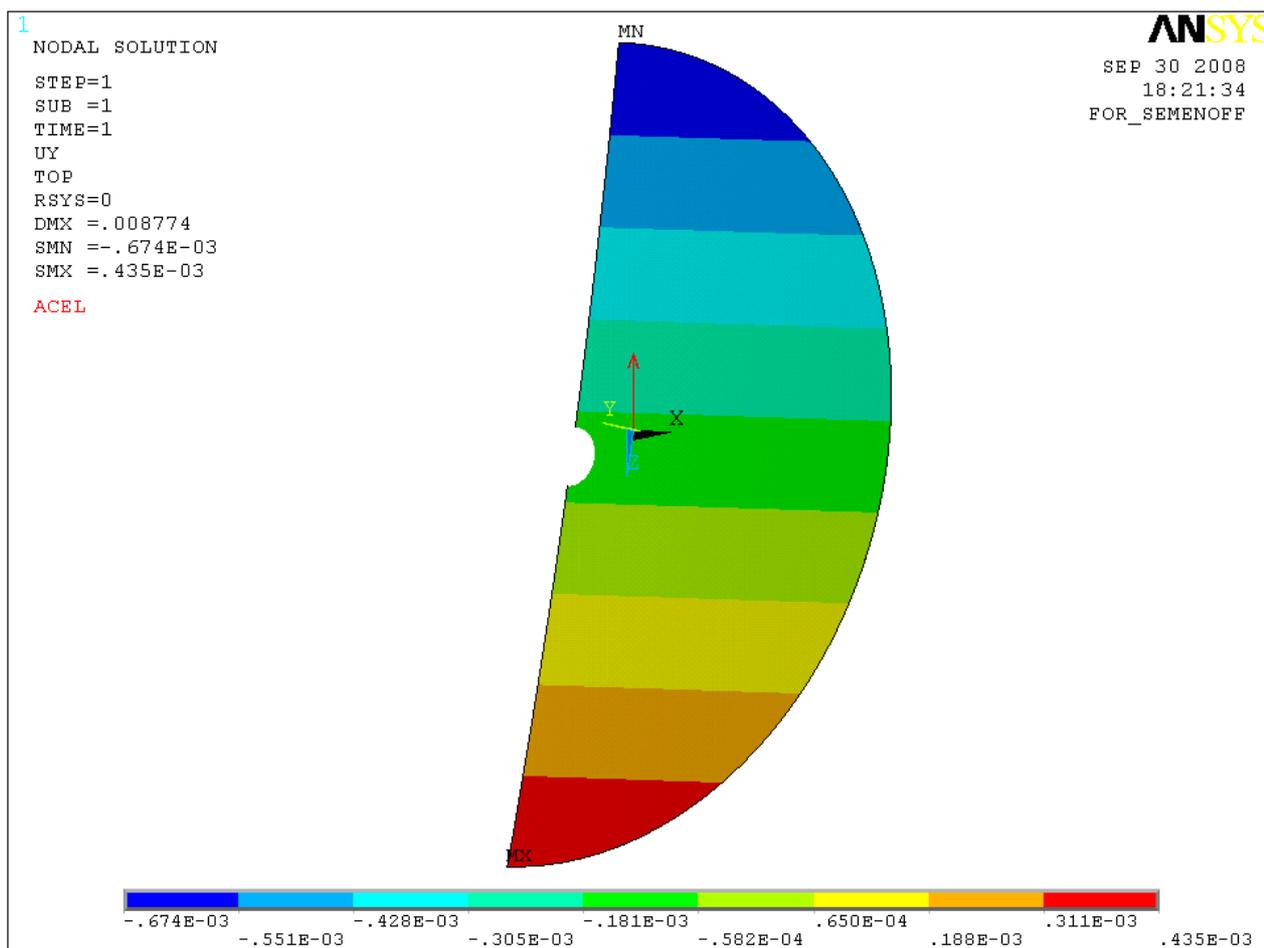


Рисунок 4.7,а

# Карта волнового фронта

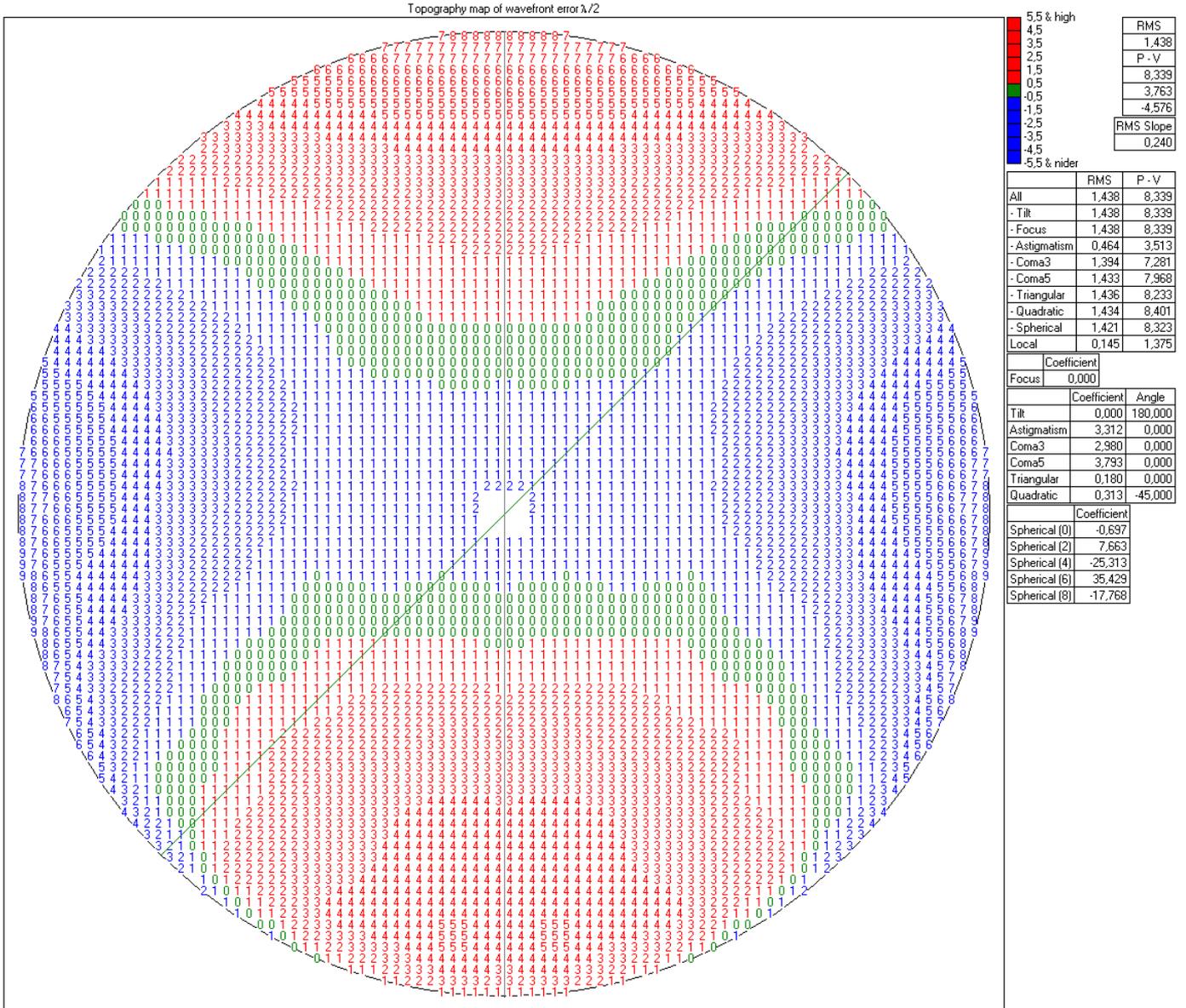


Рисунок 4.7,б

4.6. Зеркало на ленте и ложементе. Полуобхват ленты -  $90^\circ$ , крепление ложемента – по рис. 5 (в соответствии с п.1.2 вашего письма). Наклон оси визирования зеркала  $12^\circ$  к горизонту.

Решение за вычетом "проскальзывания" вдоль ложемента (корректирующий сдвиг ~ минус 9 мм вдоль Z):

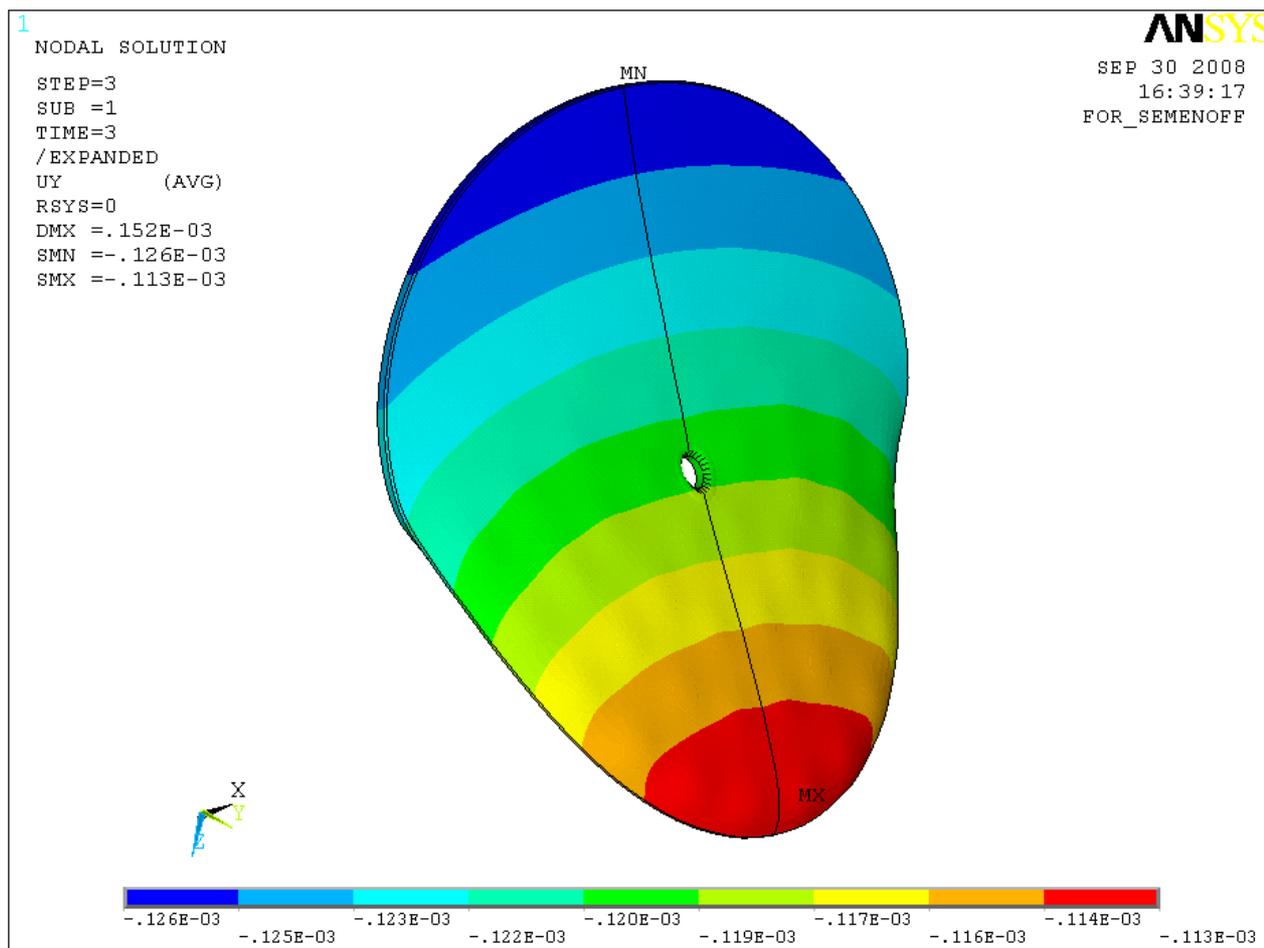


Рисунок 4.8,а (показано "отсимметризованное" по плоскости YoZ решение)

# Карта волнового фронта

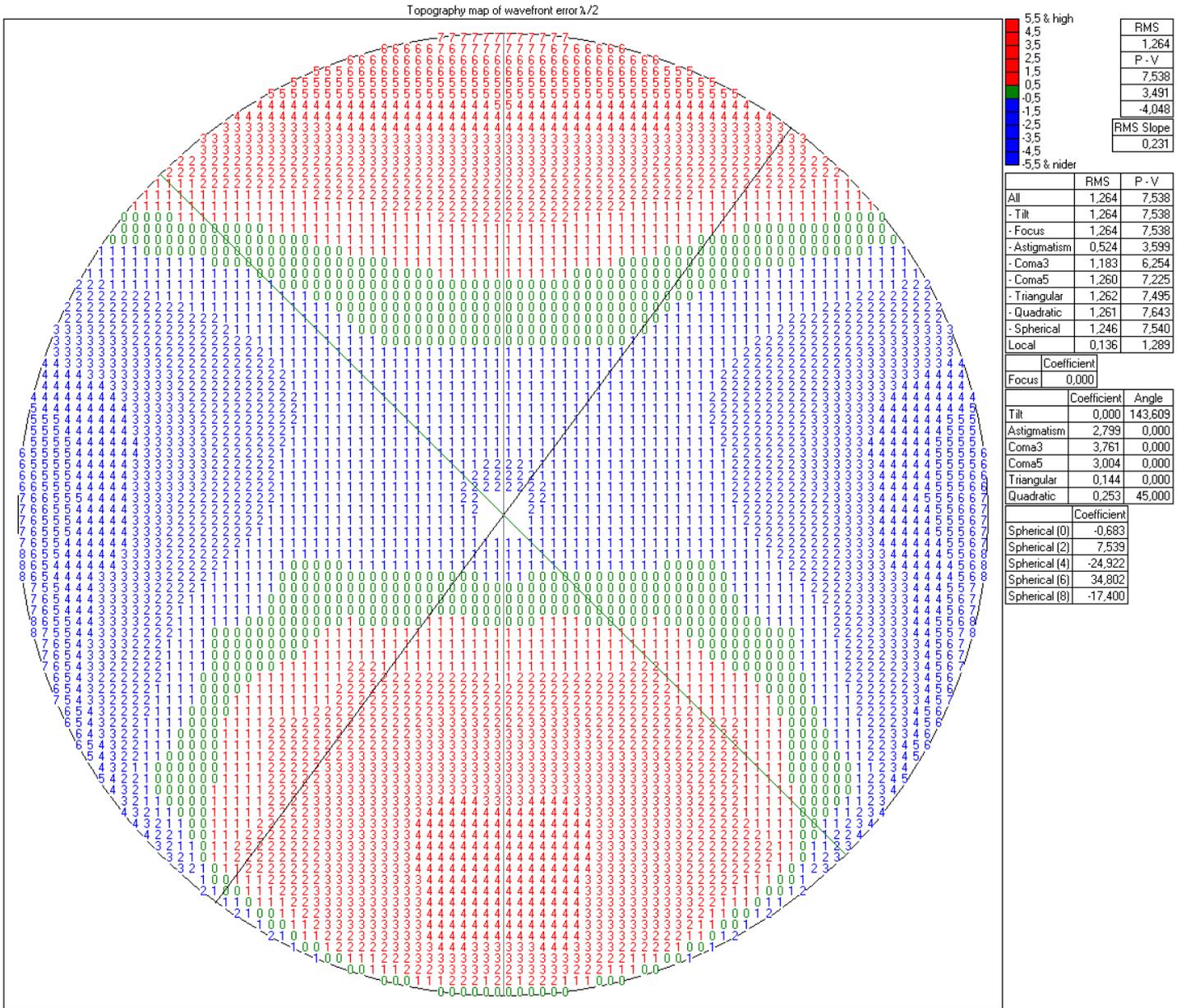


Рисунок 4.8,б (показано "отсимметризованное" по плоскости YoZ решение)

4.7. Зеркало на ленте и ложементе. Полуохват ленты -  $84^\circ$ , крепление ложемента – по рис. 5 (в соответствии с п.1.2 вашего письма). Наклон оси визирования зеркала  $12^\circ$  к горизонту.

Решение за вычетом "проскальзывания" вдоль ложемента (с "корректирующим" сдвигом):

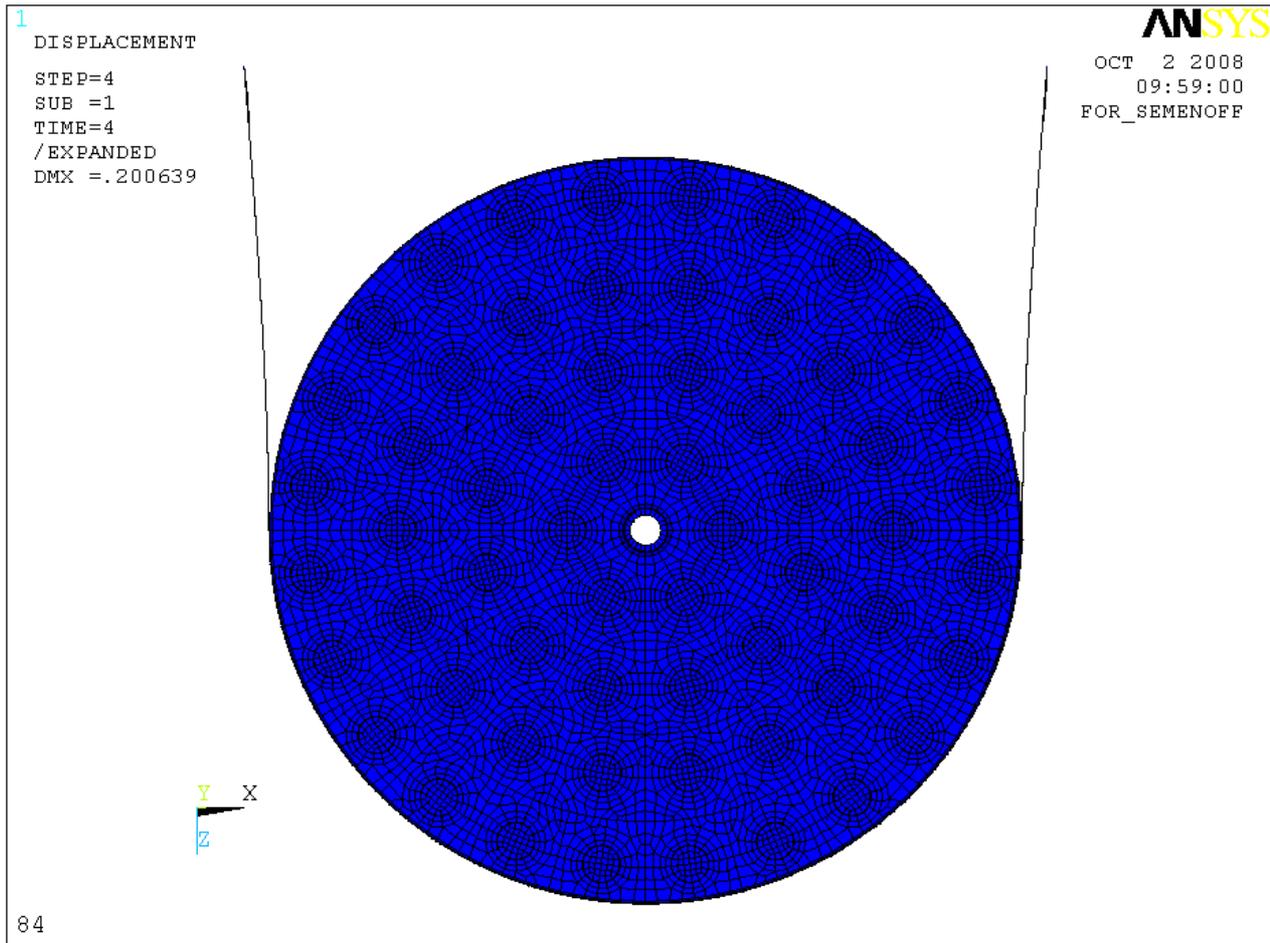


Рисунок 4.9 – Расчетная модель

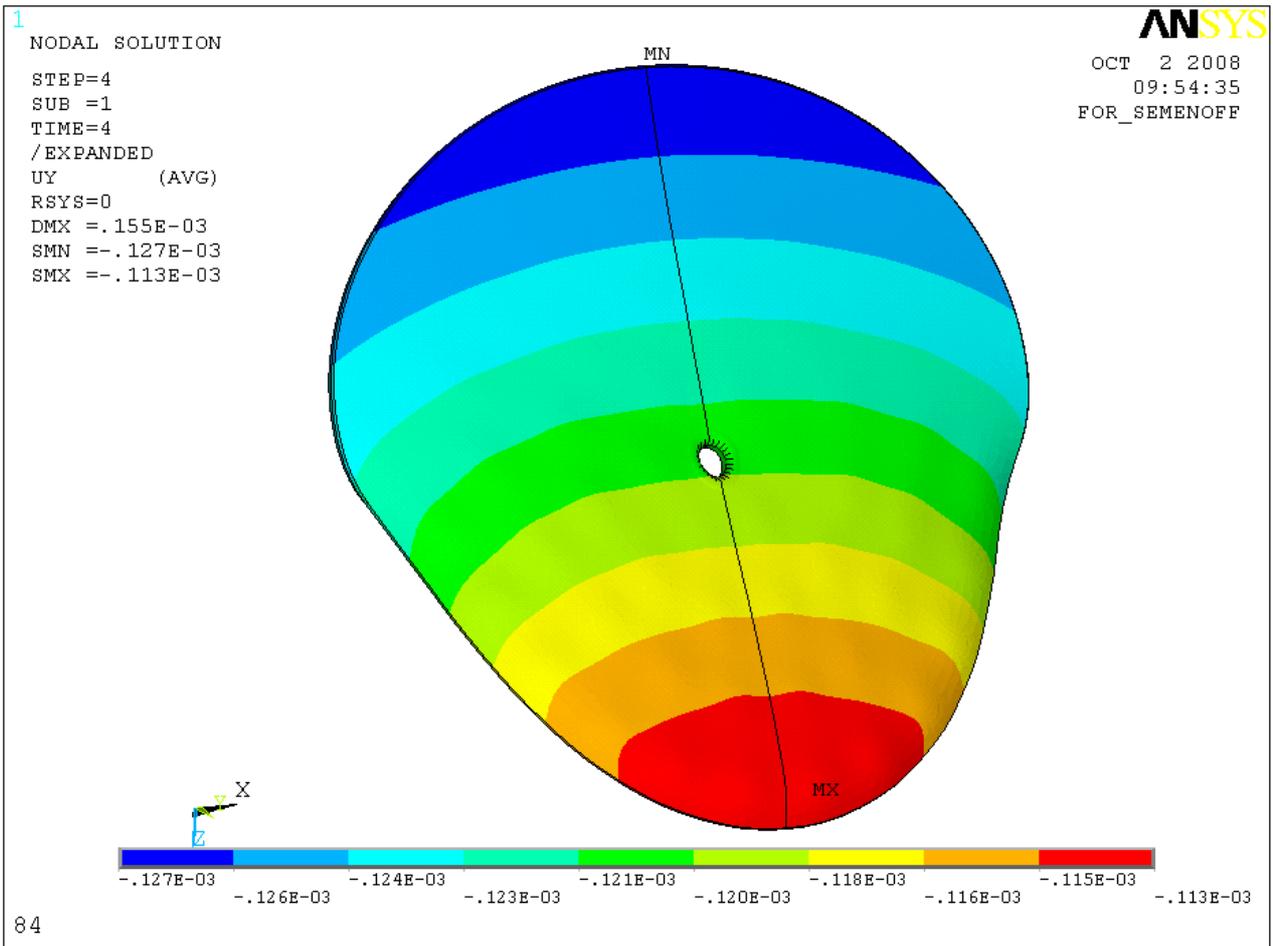


Рисунок 4.10,а (показано "отсимметризованное" по плоскости YoZ решение)

# Карта волнового фронта

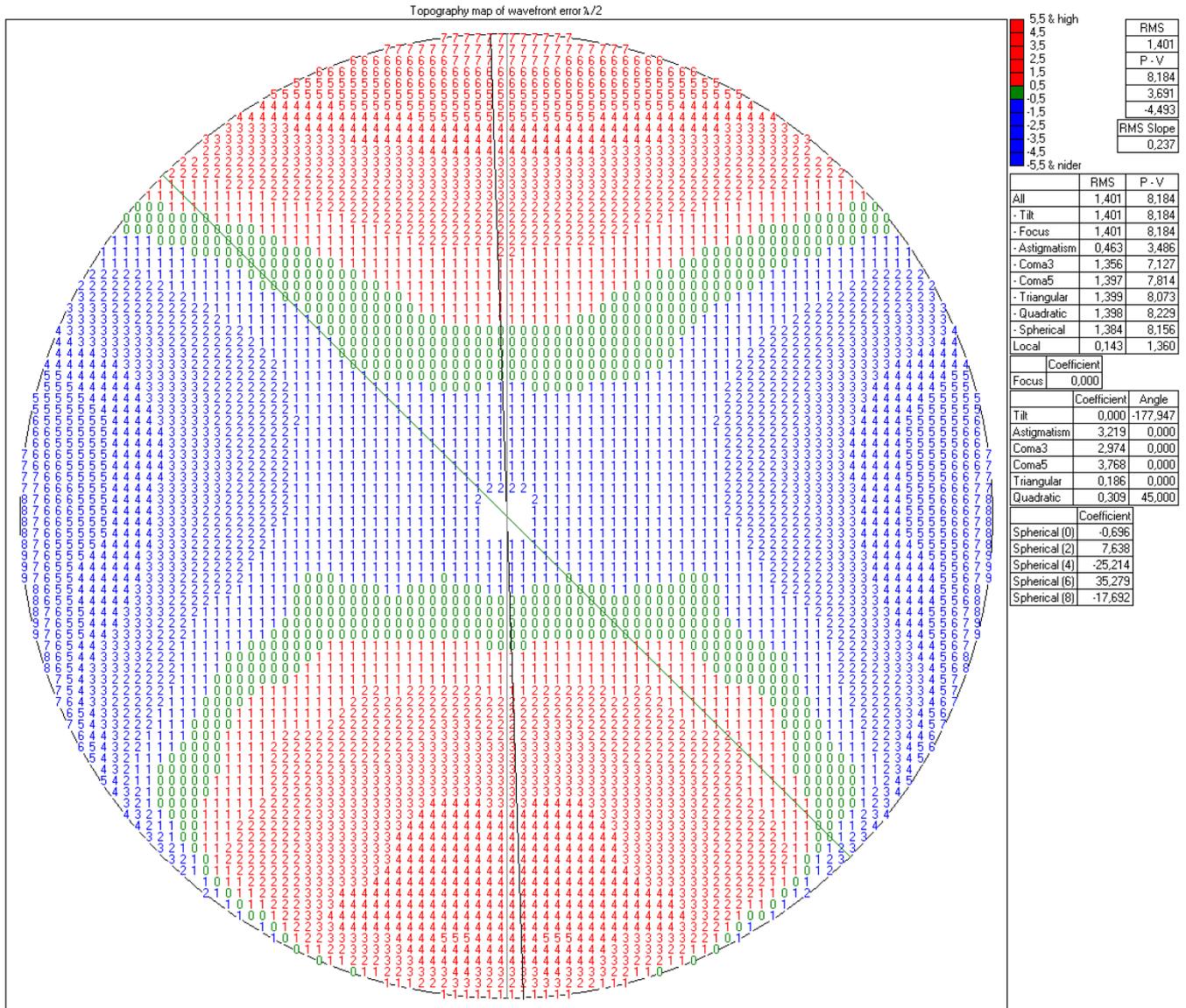


Рисунок 4.10,б (показано "отсимметризованное" по плоскости YoZ решение)

## 5. ЗЕРКАЛО БТА. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ "УТОНЕННОГО ЗЕРКАЛА".

1. "Утонение" произведено за счет снятия материала с лицевой поверхности зеркала. Строительная высота "утоненного" зеркала  $H = 542$  мм.

Масса  $M = 33583.9$  кг

Положение ц.м. (в СК модели) вдоль оси визирования  $y = 0.32658$  м

2. Штатная торцевая разгрузка.

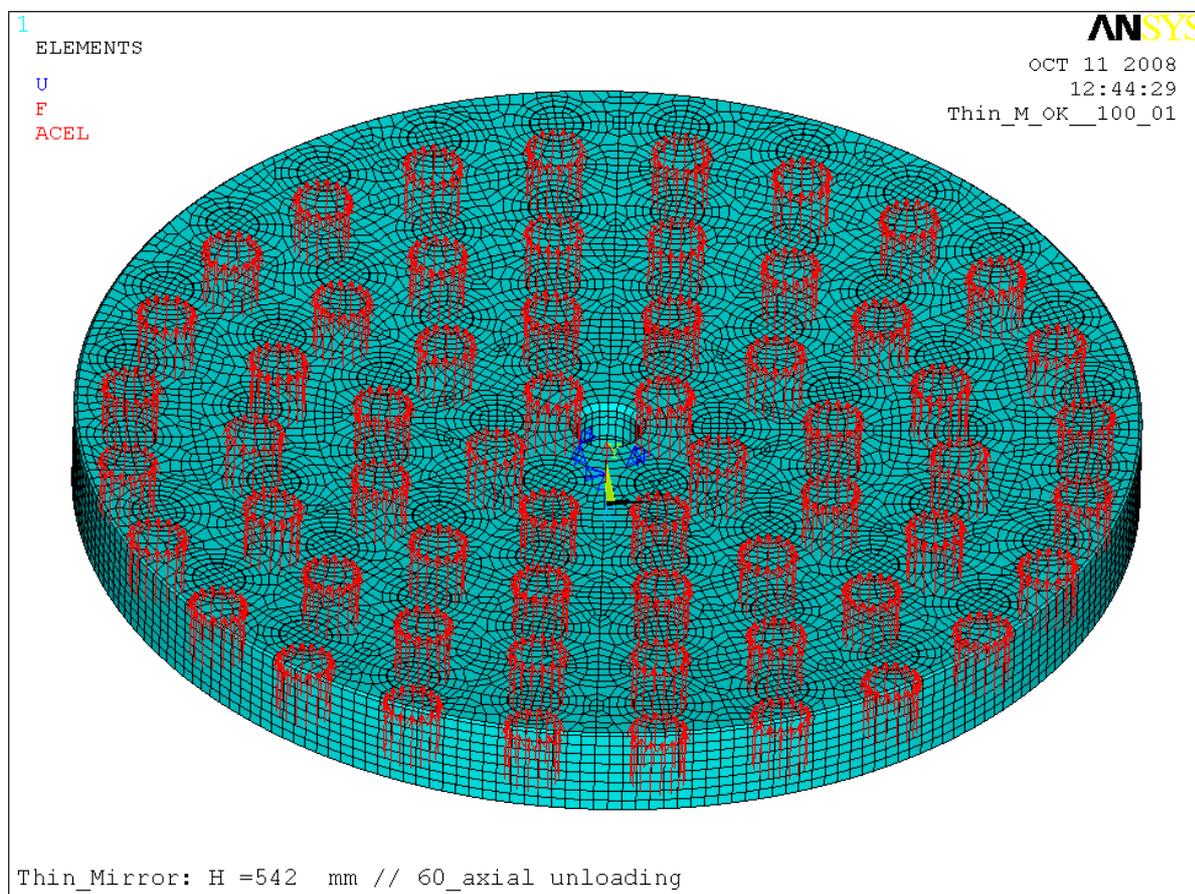


Рисунок 5.1 – КЭМ. Схема закрепления и нагружения

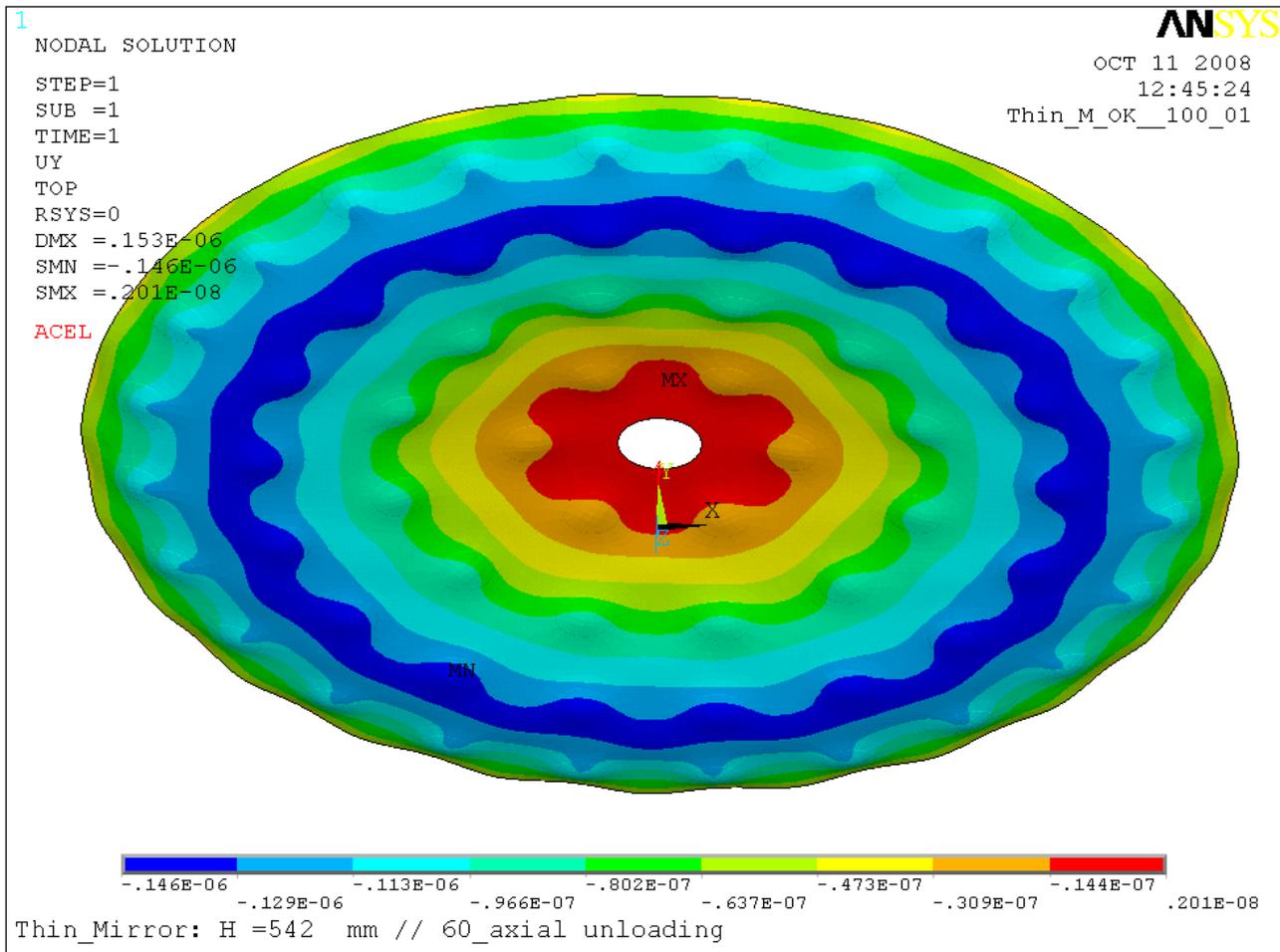


Рисунок 5.2а – Деформация опт. поверхности в направлении оси визирования (uy, м)

Файлы:

- Tm\_axi.nxyz – координаты узлов ОП,
- Tm\_axi.uu – смещения (uy, м) узлов ОП в направлении оси визирования.

# Карта отраженного волнового фронта

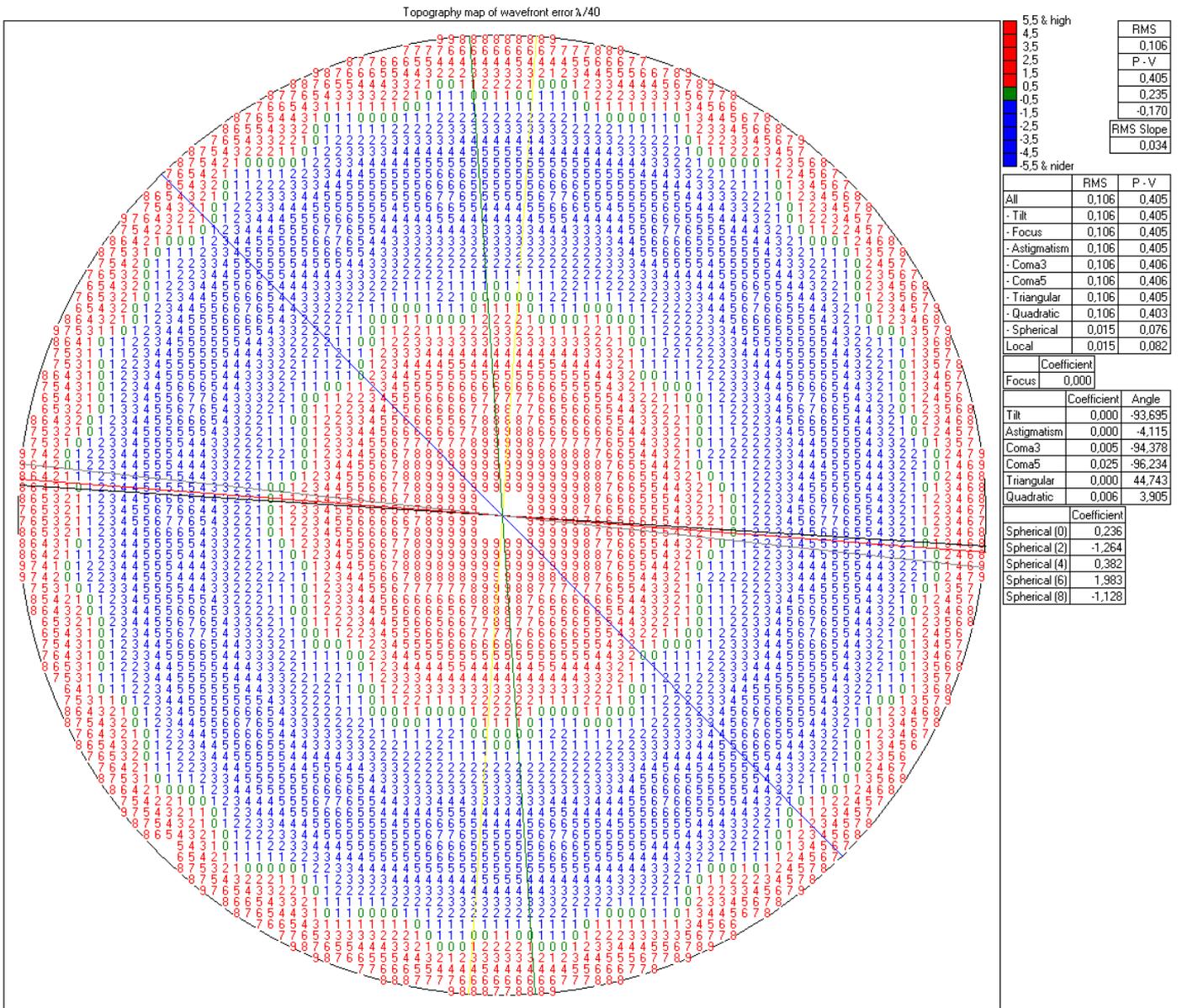


Рисунок 5.26 – Топография опт. поверхности в направлении оси визирования (цм, м)

5.3. Вариант штатной радиальной разгрузки – плоскость действия сил совпадает с плоскостью общего центра масс зеркала ( $y = 0.32658$  м по КЭМ).

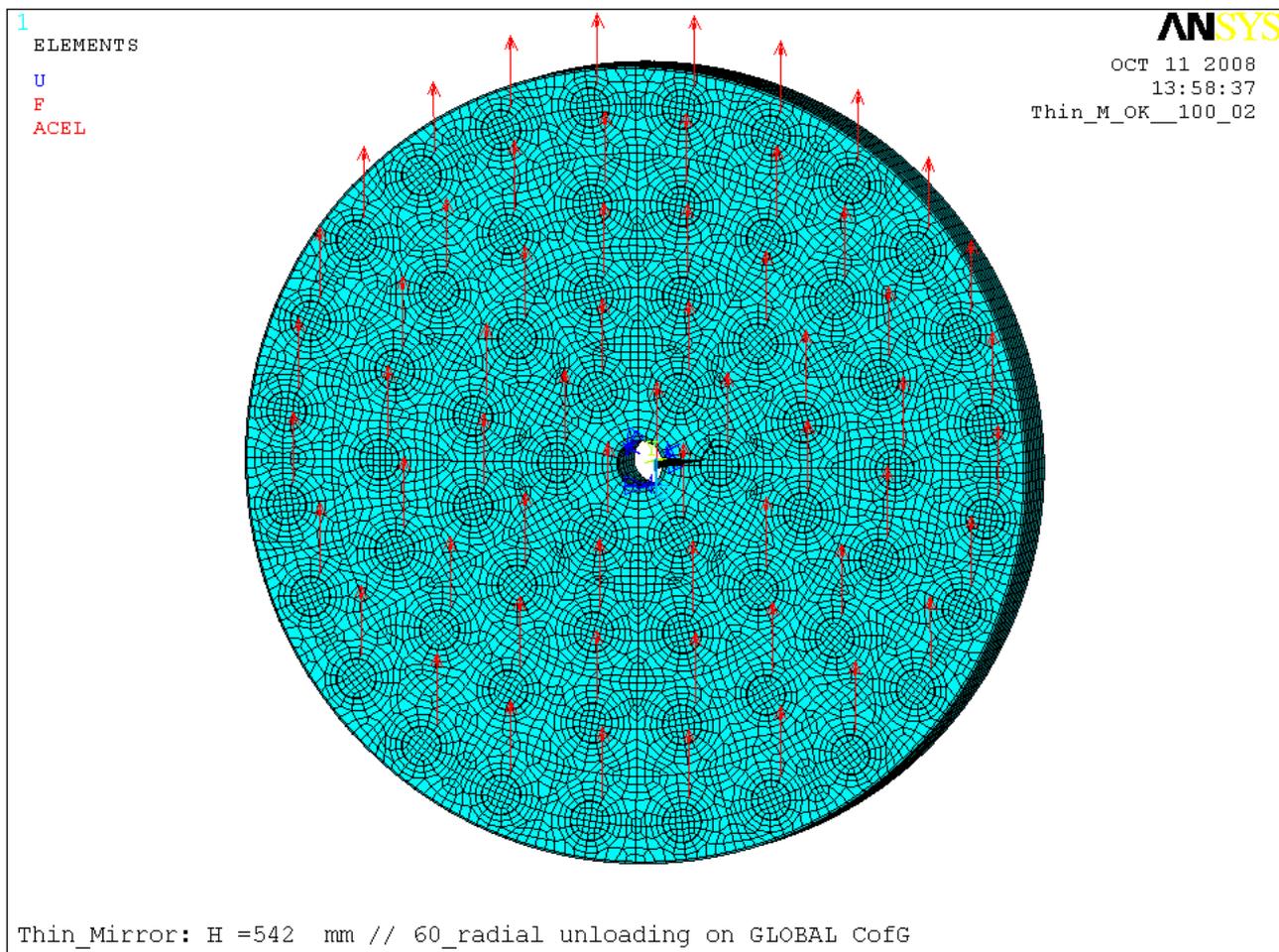


Рисунок 5.3 – КЭМ. Схема закрепления и нагружения

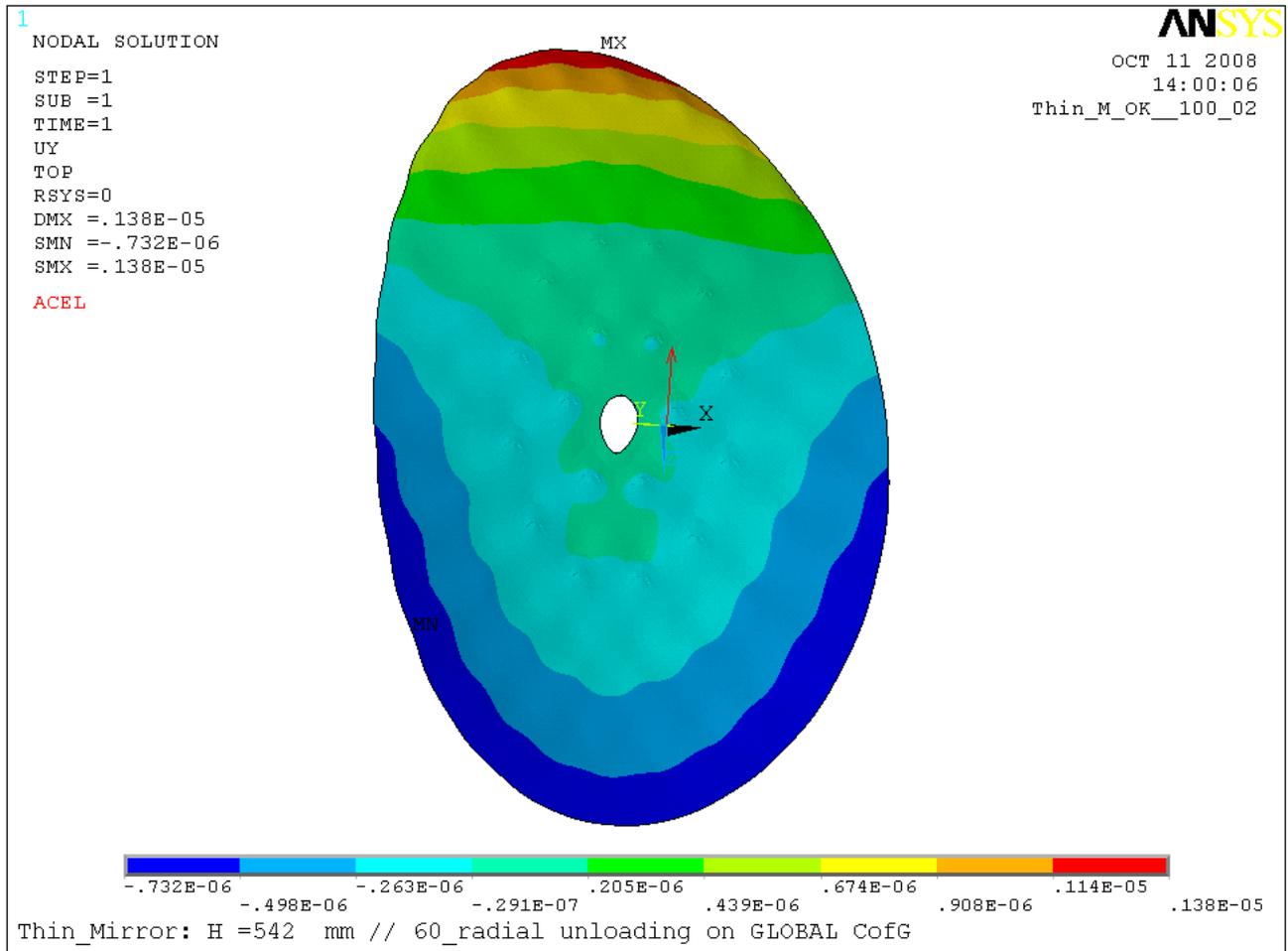


Рисунок 5.4а – Деформация опт. поверхности в направлении оси визирования (uy, м)

Файлы:

- Tm\_rad.nxyz – координаты узлов ОП,
- Tm\_rad.uy – смещения (uy, м) узлов ОП в направлении оси визирования.

## Карта отраженного волнового фронта

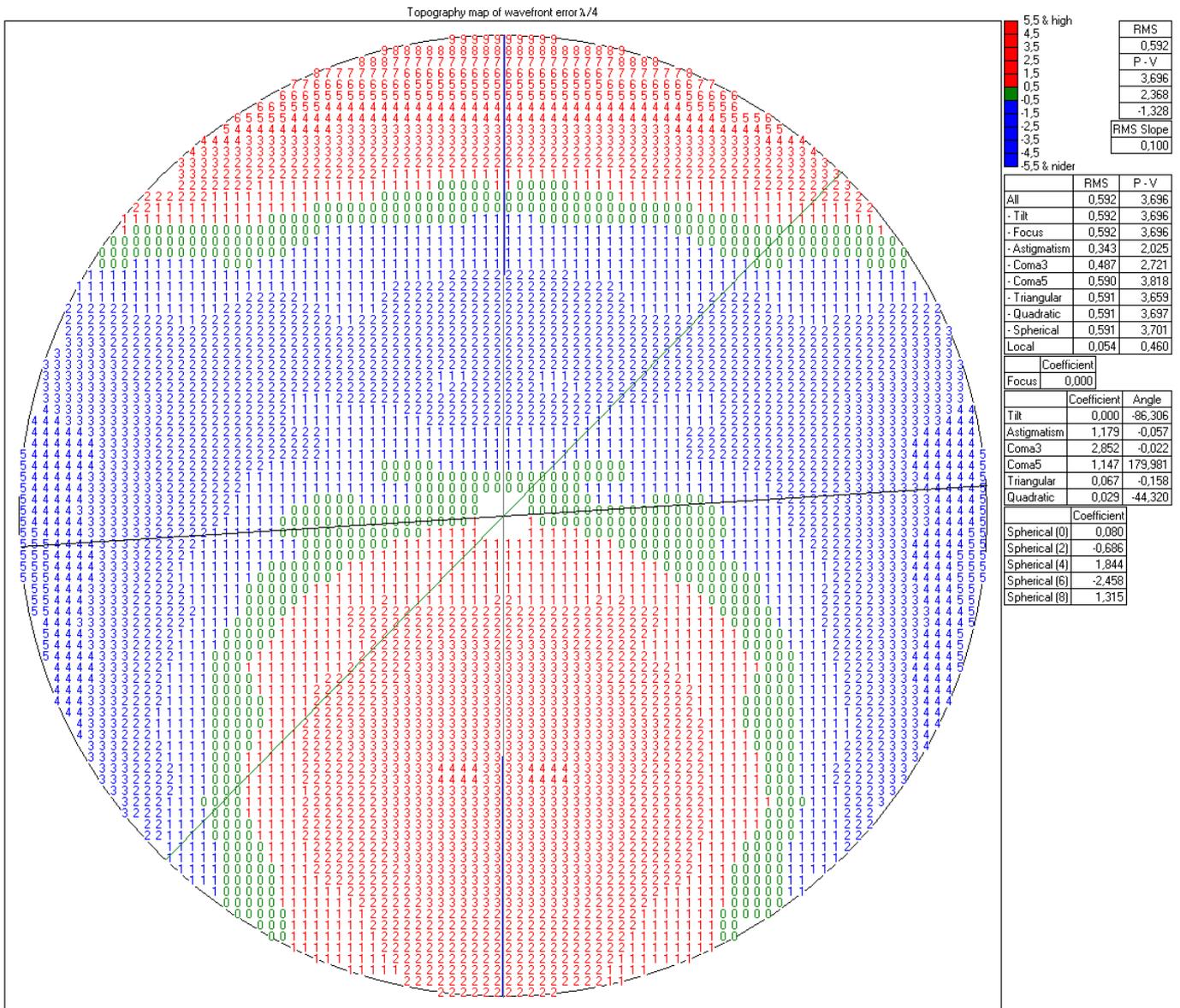


Рисунок 5.4б – Топография деформация опт. поверхности в направлении оси визирования (у, м)

5.4. Радиальная разгрузка "в ленту" – плоскость симметрии ленты, точки подвеса ленты и плоскость общего центра масс зеркала ( $y = 0.32658$  м по КЭМ) СОВПАДАЮТ!

Решение выполнено на  $\frac{1}{2}$  модели зеркала с учетом симметрии относительно плоскости  $Yoz$ !

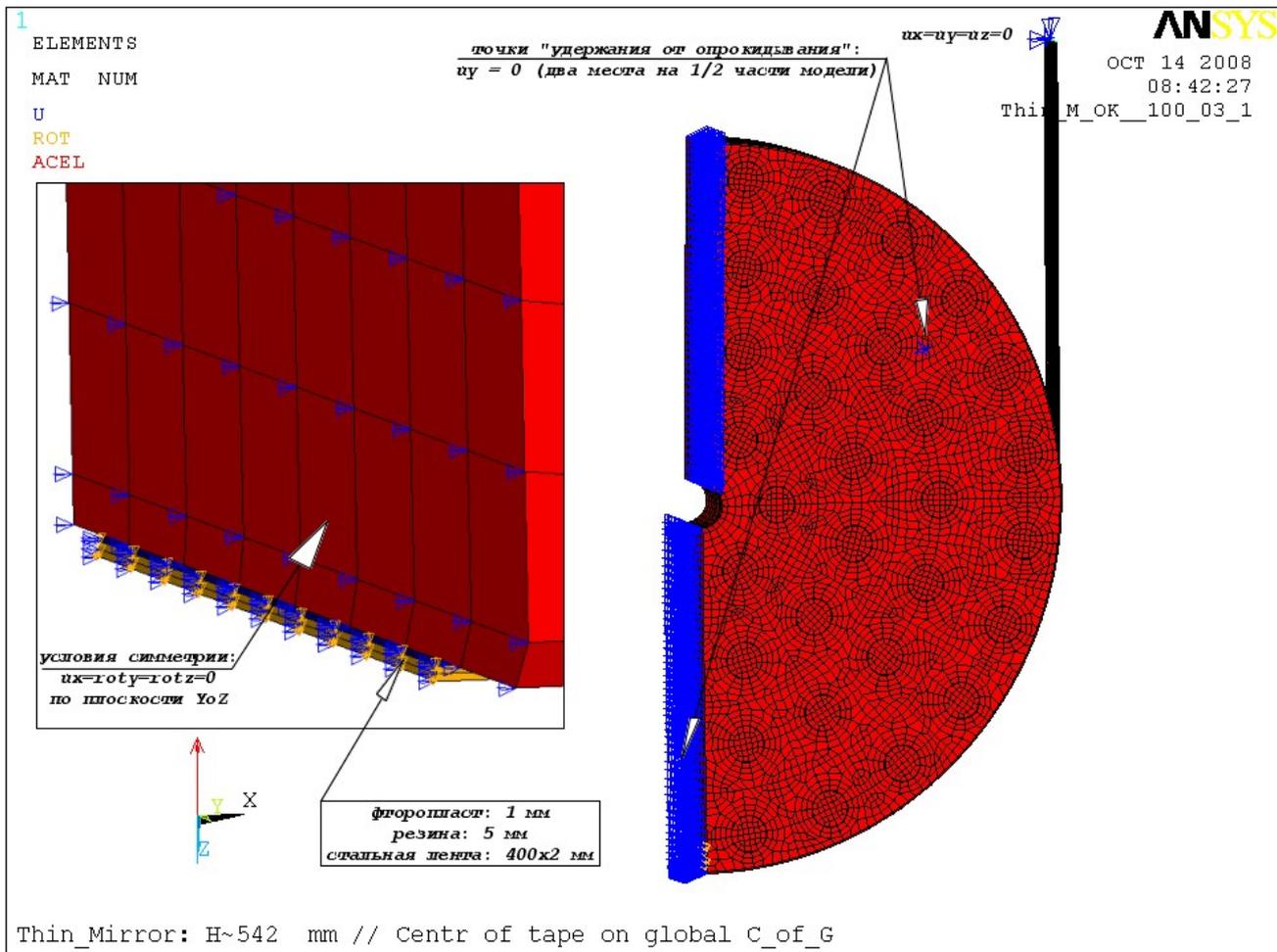


Рисунок 5.5 – КЭМ. Схема закрепления и нагружения

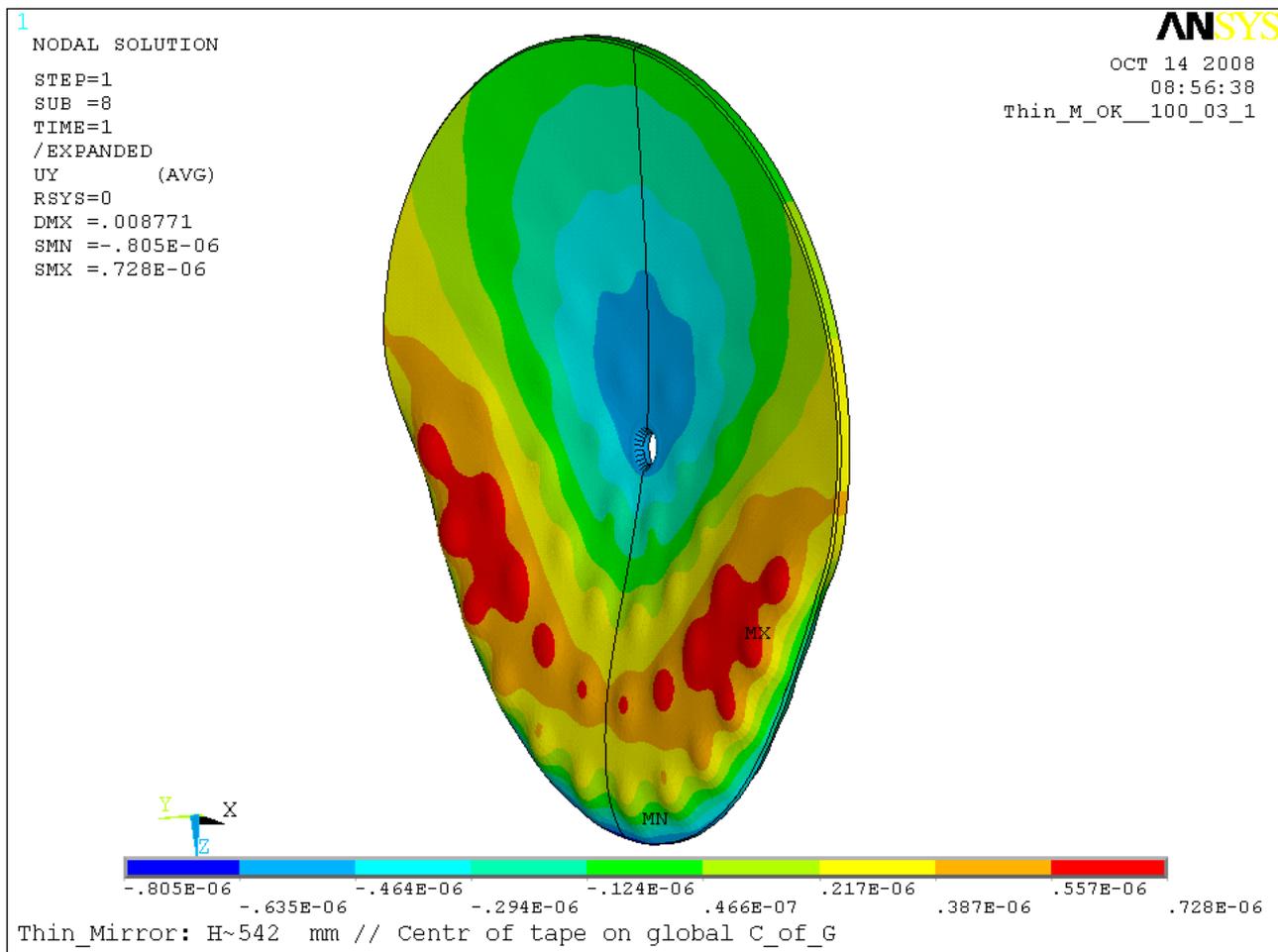


Рисунок 5.6 – Деформация опт. поверхности в направлении оси визирования (uy, м), "отсимметрированное" решение

Файлы:

- Tm\_tap.nxyz – координаты узлов ОП,
- Tm\_tap.uy – смещения (uy, м) узлов ОП в направлении оси визирования.

В ФАЙЛАХ Tm\_tap.nxyz и Tm\_tap.uy КООРДИНАТЫ И РЕШЕНИЕ (ПЕРЕМЕЩЕНИЯ) ДАНЫ ДЛЯ ВСЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ!

## Карта отраженного волнового фронта без выделения сферы

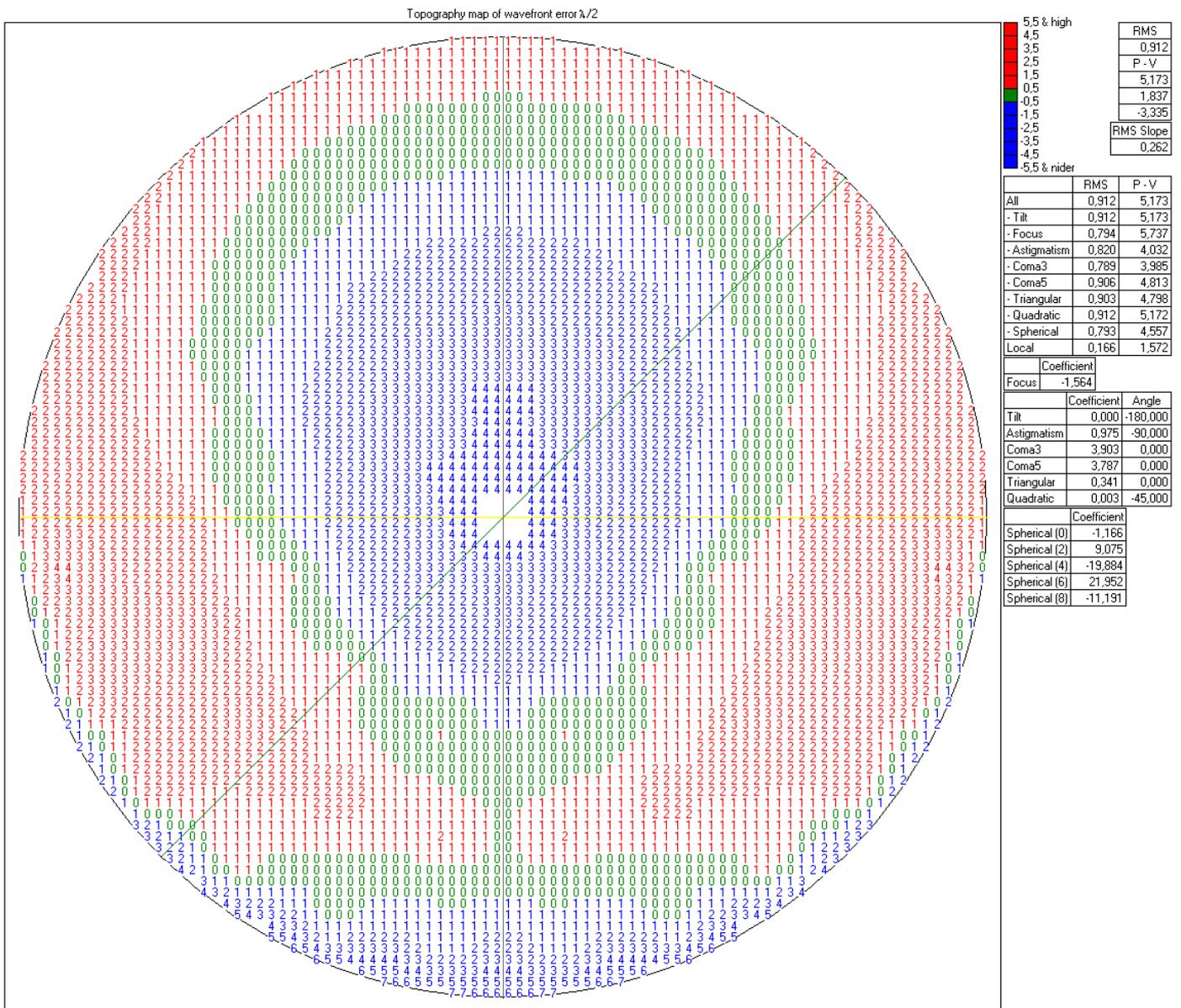


Рисунок 5.в – Топография опт. поверхности в направлении оси визирования (у, м), "отсимметрированное" решение

## Карта отраженного волнового фронта с выделением сферы

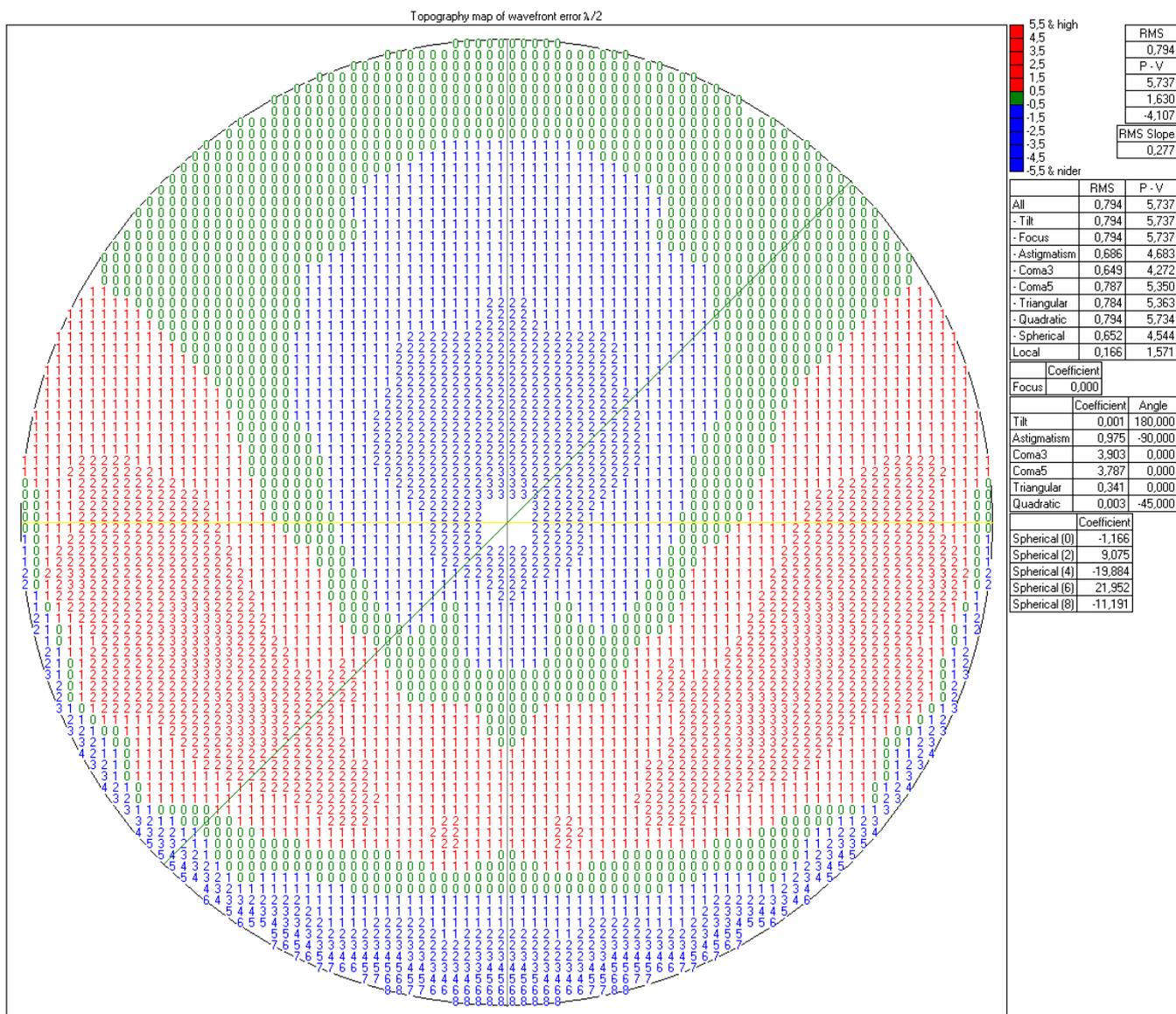


Рисунок 5.г – Топография опт. поверхности в направлении оси визирования (у, м), "отсимметрированное" решение

## 6. ЗЕРКАЛО БТА. РАЗГРУЗКА В ЛЕНТУ ДЛЯ "ТОЛСТОГО (642 мм)" ЗЕРКАЛА.

Ось визирования (ось Y системы координат модели) - горизонтально.

Для данного случая обезвешивания (рисунок б.1):

$$PV = 1,146 \text{ мкм } (1,81\lambda)$$

$$RMS = 219 \text{ нм } (0,347\lambda)$$

$$RMS_{5...28} = 180 \text{ нм } (0,285\lambda)$$

$$s_{j,1} = 1.8659689160284782e-07$$

$$s_{j,2} = 1.2390253432888796e-07$$

$$s_{j,3} = 0$$

$$s_{j,4} = -1.8236394829075483e-08$$

$$s_{j,5} = 0$$

$$s_{j,6} = 1.2098253752936559e-09$$

$$s_{j,7} = 0$$

$$s_{j,8} = -1.3306178486587627e-07$$

$$s_{j,9} = 0$$

$$s_{j,10} = -8.132559496114328e-09$$

$$s_{j,11} = -1.1424819345266949e-07$$

$$s_{j,12} = 3.333536127003861e-10$$

$$s_{j,13} = 0$$

$$s_{j,14} = 3.166688345164727e-11$$

$$s_{j,15} = 0$$

$$s_{j,16} = -3.2731702301316846e-08$$

$$s_{j,17} = 0$$

$$s_{j,18} = 2.27782867806456e-08$$

$$s_{j,19} = 0$$

$$s_{j,20} = -1.1318391280084185e-09$$

$$s_{j,21} = 0$$

$$s_{j,22} = -7.077912416638265e-09$$

$$s_{j,23} = 0$$

$$s_{j,24} = 2.485444992976115e-11$$

$$s_{j,25} = 0$$

$$s_{j,26} = -5.5350068695826214e-11$$

$$s_{j,27} = 0$$

$$s_{j,28} = 1.5529470451400213e-09$$

где:

```

A := s
for j ∈ 1..rows(XY_PLAN)
  sj,1 ← 1
  sj,2 ← √4 RNj · cos(ψj)
  sj,3 ← √4 RNj · sin(ψj)
  sj,4 ← √3 [2 · (RNj)2 - 1]
  sj,5 ← √6 (RNj)2 · sin(2 · ψj)
  sj,6 ← √6 (RNj)2 · cos(2 · ψj)
  sj,7 ← √8 [3 · (RNj)3 - 2 · RNj] · sin(ψj)
  sj,8 ← √8 [3 · (RNj)3 - 2 · RNj] · cos(ψj)
  sj,9 ← √8 (RNj)3 · sin(3 · ψj)
  sj,10 ← √8 (RNj)3 · cos(3 · ψj)
  sj,11 ← √5 [6 (RNj)4 - 6 (RNj)2 + 1]
  sj,12 ← √10 [4 (RNj)4 - 3 (RNj)2] · cos(2 · ψj)
  sj,13 ← √10 [4 (RNj)4 - 3 (RNj)2] · sin(2 · ψj)
  sj,14 ← √10 (RNj)4 · cos(4 · ψj)
  sj,15 ← √10 [(RNj)4 · sin(4 · ψj)]
  sj,16 ← √12 [10 (RNj)5 - 12 (RNj)3 + 3 RNj] · cos(ψj)
  sj,17 ← √12 [10 (RNj)5 - 12 (RNj)3 + 3 RNj] · sin(ψj)
  sj,18 ← √12 [5 (RNj)5 - 4 (RNj)3] · cos(3 · ψj)
  sj,19 ← √12 [5 (RNj)5 - 4 (RNj)3] · sin(3 · ψj)
  sj,20 ← √12 (RNj)5 · cos(5 · ψj)
  sj,21 ← √12 (RNj)5 · sin(5 · ψj)
  sj,22 ← √7 [20 (RNj)6 - 30 (RNj)4 + 12 (RNj)2 - 1]
  sj,23 ← √14 [15 (RNj)6 - 20 (RNj)4 + 6 (RNj)2] · sin(2 · ψj)
  sj,24 ← √14 [15 (RNj)6 - 20 (RNj)4 + 6 (RNj)2] · cos(2 · ψj)
  sj,25 ← √14 [6 (RNj)6 - 5 (RNj)4] · sin(4 · ψj)
  sj,26 ← √14 [6 (RNj)6 - 5 (RNj)4] · cos(4 · ψj)
  sj,27 ← √14 (RNj)6 · sin(6 · ψj)
  sj,28 ← √14 (RNj)6 · cos(6 · ψj)
s

```

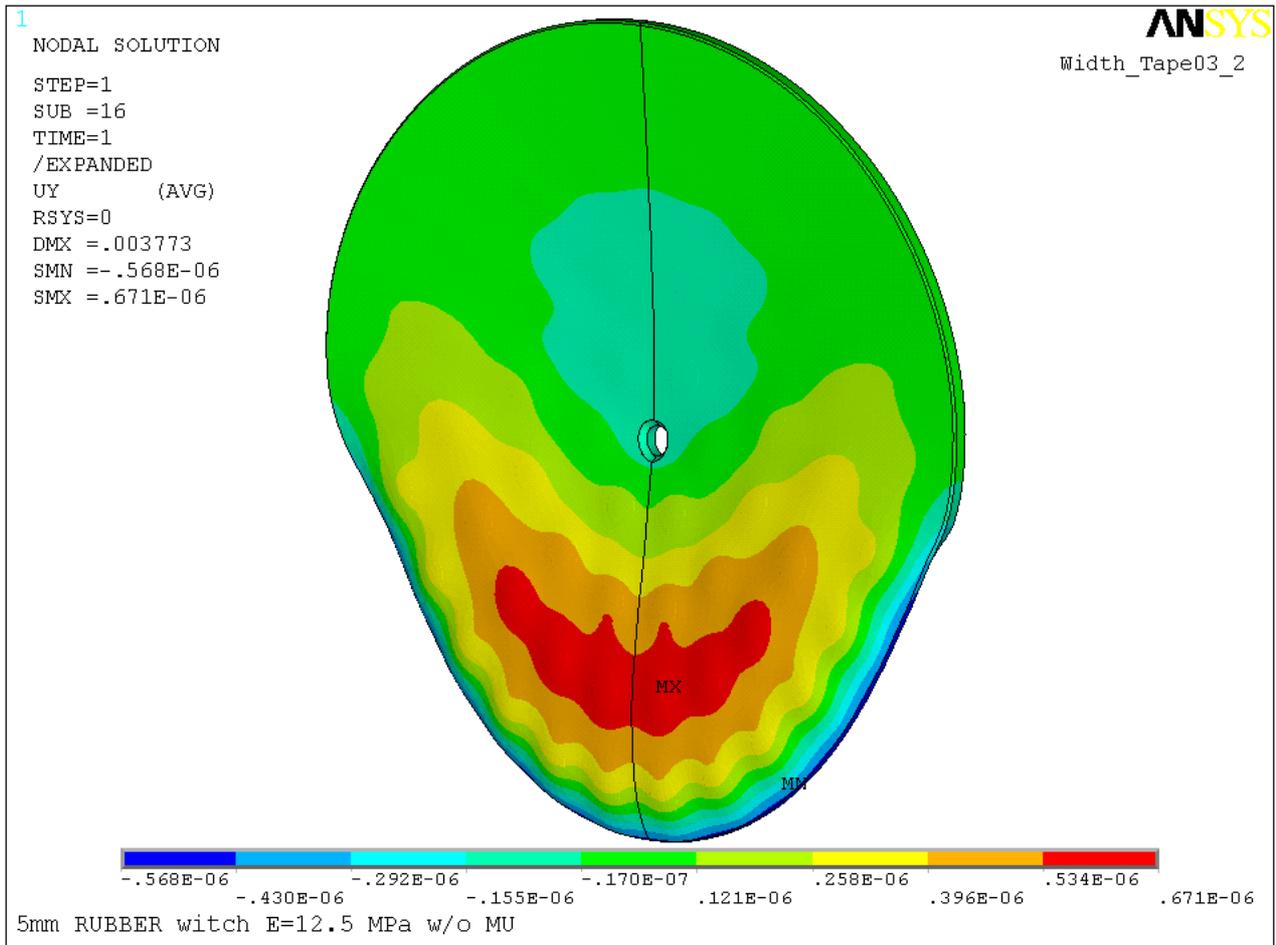


Рисунок 6.1 – Диаграмма смещений (метры) узлов ОП зеркала в направлении оси визирования. Радиальная разгрузка. Имитация разгрузки в ленте. "ТОЛСТОЕ" ЗЕРКАЛО

# Топография волнового фронта

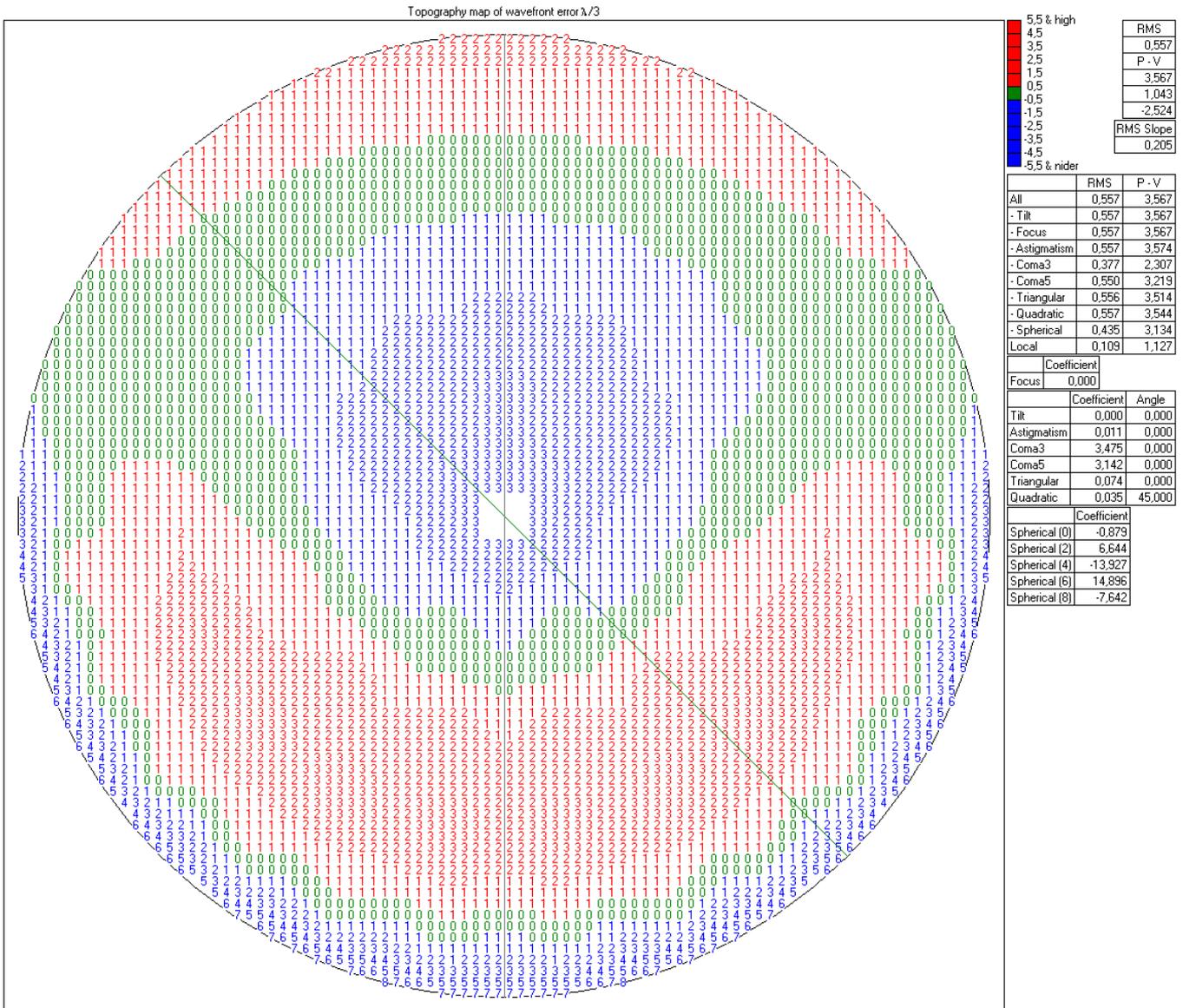


Рисунок 6.2 – Топография ОП зеркала в направлении оси визирования. Разгрузка в ленте. "ТОЛСТОЕ" ЗЕРКАЛО

# Приложение

## Рис. 2

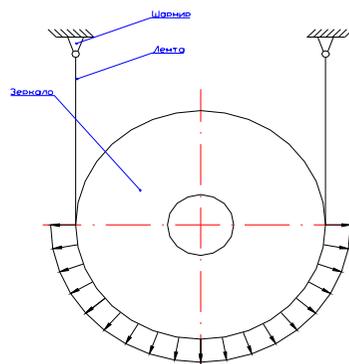


Рис. 2 Схема распределения усилий при вертикальном расположении зеркала (радиальная разгрузка)

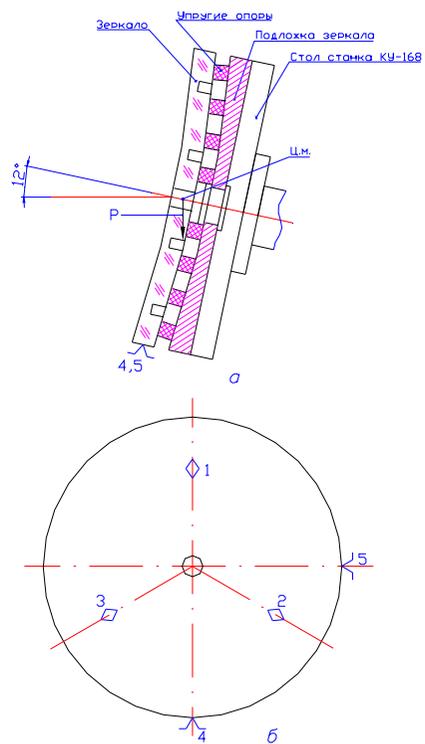


Рис. Схема базирования зеркала  
 - а. Радиальная разгрузка + торцевая разгрузка  
 - б. Торцевая разгрузка  
 √, ◊ - базовые точки  
 P - силовое замыкание

Рис. 3,а

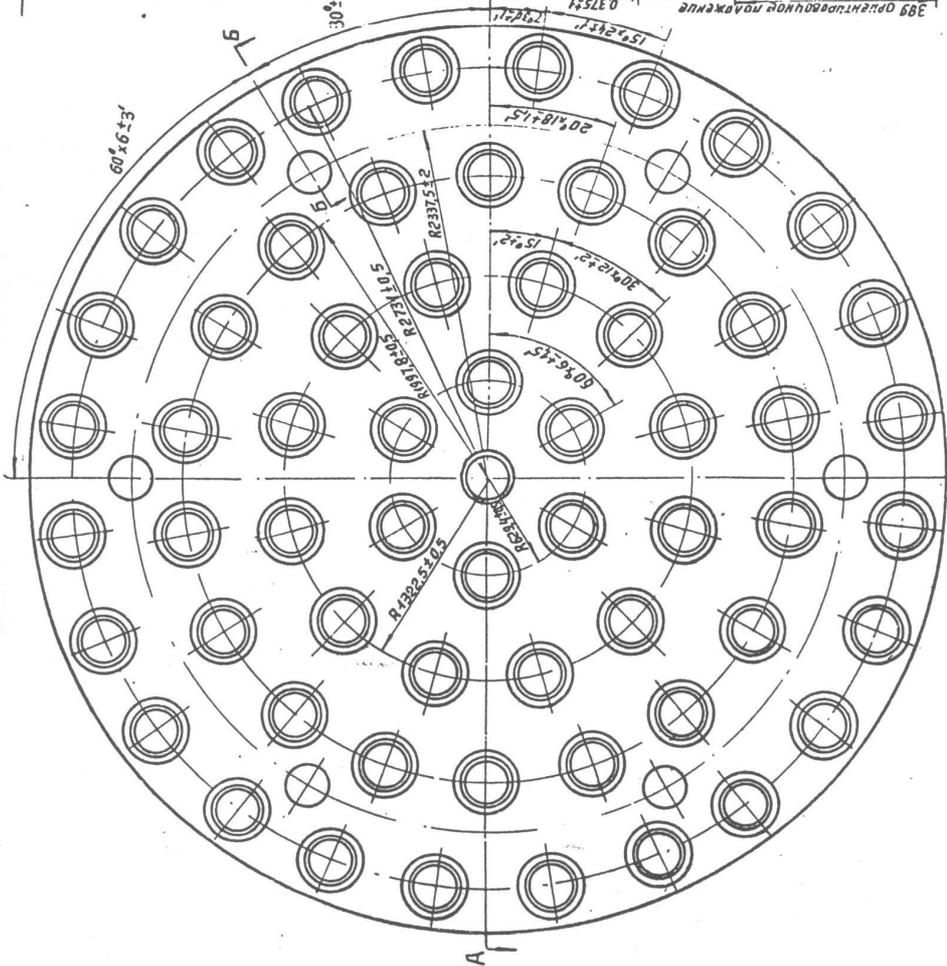
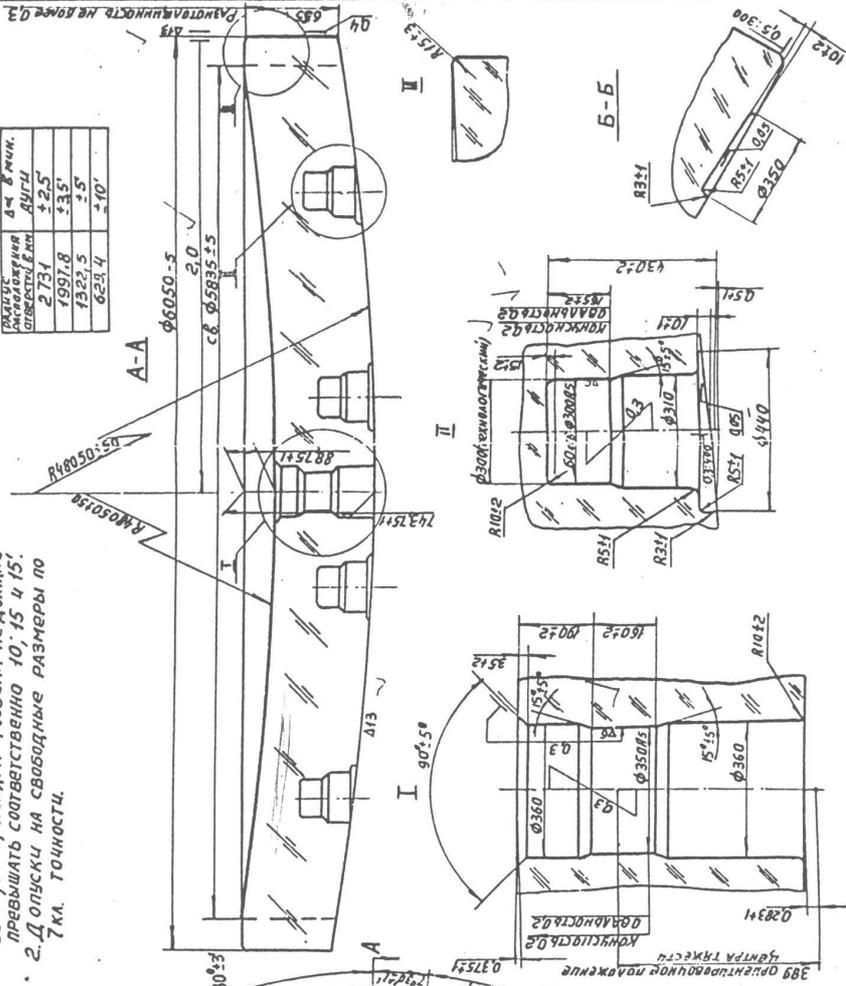


### Чертеж заготовки главного зеркала

1. Непараллельность осей 60<sup>th</sup> отверстий  $\phi 300$  As относительно друг друга, оси центрального отверстия  $\phi 350$  As и обрешеченной цилиндра  $\phi 6050$  мм не должны превышать соответственно 10, 15 и 15', 7 кл. точности.
2. Допуски на свободные размеры по 7 кл. точности.

Предельные угловые отклонения  $\Delta\alpha$  между любыми не смежными отверстиями.

Радиус от центра отверстия, мм	$\Delta\alpha$ в мм.
2731	$\pm 2,5'$
1997,8	$\pm 3,5'$
1527,5	$\pm 5'$
623,4	$\pm 10'$



Примечание: Выполнено с чертежа БТА2-184

Рис. 1

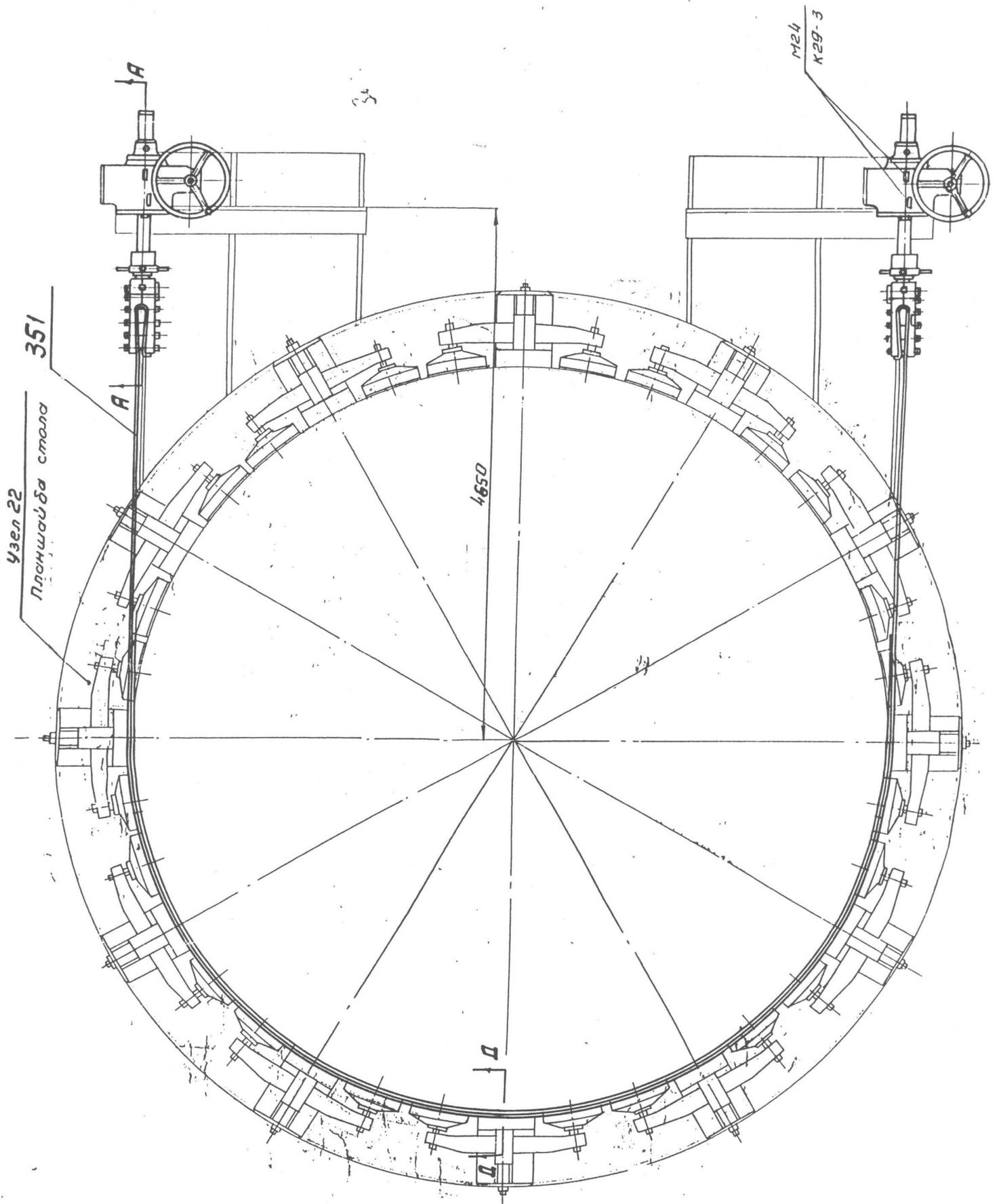


Рис. 4а

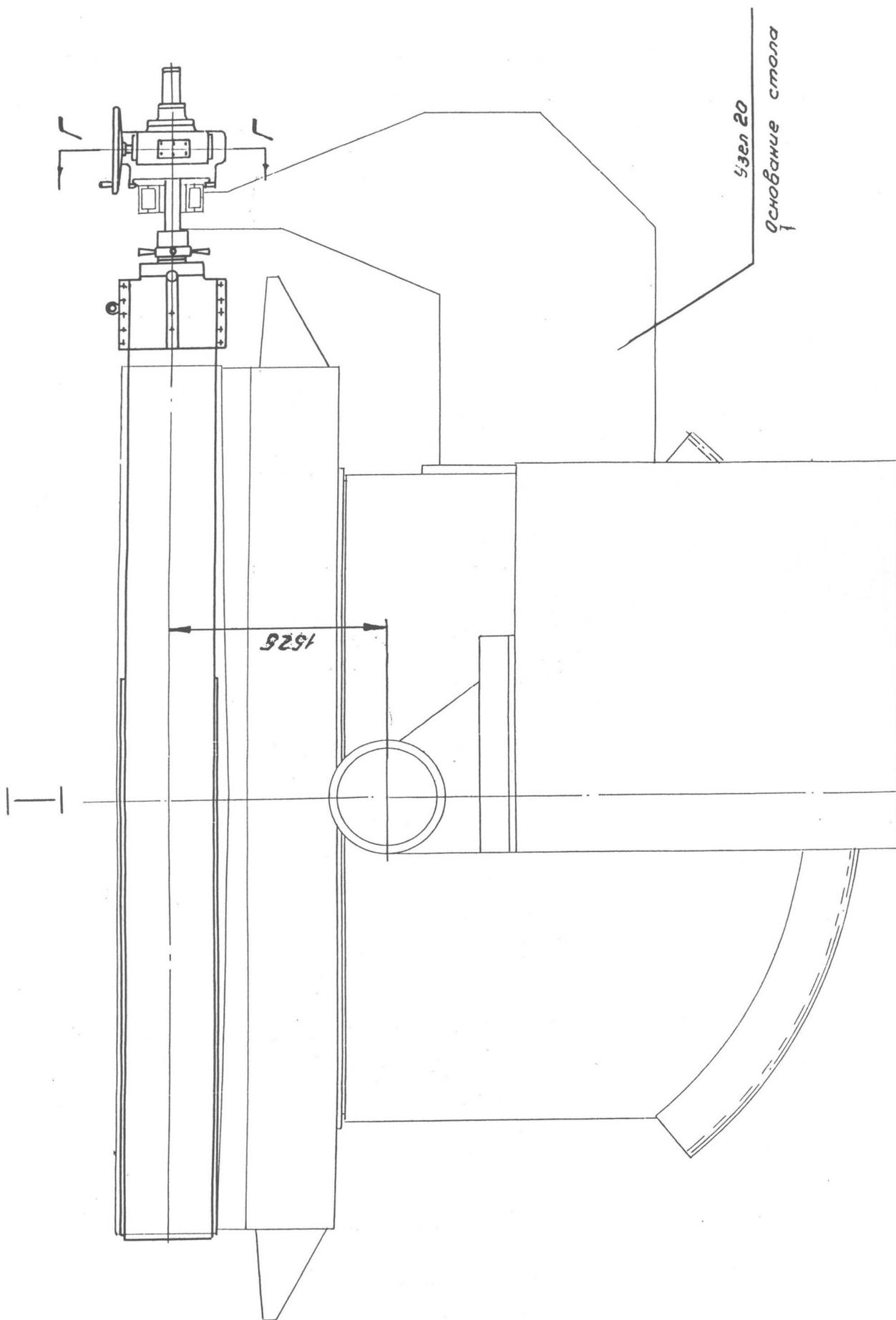


Рис.46

## Заключение.

1. Проведенное двумя независимыми экспертами численное исследование методом конечных элементов влияния различных схем базирования и способов разгрузки ГЗ БГА №1 на величину и характер деформации его оптической поверхности дало следующие результаты:

таблица 1

Уровень деформации ОП ГЗ БГА №1.

№	Способ разгрузки	Эксперт1	Эксперт2
1	Торцевая штатная. Оптическая ось зеркала вертикальна	0,04λ	0,036λ
2	Торцевая технологическая на подложке с упругими резинофторопластовыми опорами. Оптическая ось зеркала вертикальна	-	0,19λ
3	Радиальная штатная Оптическая ось зеркала горизонтальна	0,1λ	0,28λ
4	Радиальная технологическая в «ленте» Оптическая ось зеркала горизонтальна	-	0,283λ
5	Технологическая в «ленте» Оптическая ось зеркала по углом 12° к горизонту - теоретический случай без учета деформации подложки - с учетом деформации подложки на станке КУ-168 I угол обхвата «ленты» 90° II угол обхвата «ленты» 84°	0,105λ  - -	0,285λ  0,63λ 0,7λ
6	Штатные торцевая и радиальная. Оптическая ось зеркала под углом 12° к горизонту.	-	0,28λ
7	Штатная радиальная с опиранием на 6 торцевых домкратов. Оптическая ось зеркала под углом 12° к горизонту.	-	0,46λ

таблица 2

Уровень деформации ОП ГЗ БТА (облегчение за счет уменьшения толщины рабочей поверхности)

№	H=542мм, масса 33583,9кг		
1	Штатная торцевая Оптическая ось зеркала вертикальная	-	0,05λ
2	Штатная радиальная Оптическая ось зеркала горизонтальная	-	0,3λ
3	Технологическая в «ленте» Оптическая ось зеркала горизонтальная	-	0,4λ

2. Анализ величины деформации ОП ГЗ БТА (таблицы 1 и 2) показывает некоторое снижение жесткостных характеристик облегченного ГЗ (после уменьшения толщины рабочей поверхности), что предполагает проведение оптимизации положения точек радиальной штатной разгрузки телескопа.

3. Наилучшие условия деформации ГЗ БТА получены для случаев:

- разгрузки зеркала в радиальной штатной (технологической) разгрузке (оптическая ось зеркала горизонтальная, пункт 3 таб. 1)
- разгрузки зеркала в «ленте» (оптическая ось зеркала горизонтальная, пункт 4 таб. 1).

4. После ремонта рабочей поверхности зеркала реально достижимо СКО поверхности 0,283λ (пункт 4 табл1).

В результате форма поверхности зеркала, полученная при технологической разгрузке в «ленте» для случая горизонтального расположения оптической оси будет близка к расчетному значению при установке зеркала в штатную оправу для случая вертикального расположения оптической оси зеркала.