

УДК 520

Технологические аспекты создания крупногабаритных оптических телескопов

проф., д.т.н. Сычев В. В.^{1,*}

^{*}viktorsychev@list.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Развитие крупногабаритного оптического телескопостроения во многом определяется уровнем технологических возможностей в реализации научно-технических идей. В настоящее время в мире успешно работают множество крупногабаритных телескопов, Разрабатываются новые проекты более совершенных телескопов. Все разработки подчинены одной цели – увеличить количество информации путем увеличения диаметра главного зеркала телескопа. В статье приведен анализ развития адаптивного телескопостроения в нашей стране. На примере отечественного телескопа АСТ-25 рассмотрены технологические аспекты создания крупногабаритных оптических телескопов. Отмечены особенности концепции построения телескопа, позволившие достичь предельно возможных характеристик, обеспечивающих получение максимального количества информации. Проведено сравнение между собой целого ряда проектов крупногабаритных телескопов по технологическим критериям. Показано, что отечественный проект адаптивного супертелескопа АСТ-25 превосходит зарубежные аналоги, а проекты Еuro50 (50м) и OWL (100м) не имеет смысла реализовывать Ключевые слова: крупногабаритные оптические телескопы, критерий информативности, адаптивные оптические системы, искажающие факторы.

Ключевые слова: крупногабаритные оптические телескопы, критерий информативности, адаптивные оптические системы, искажающие факторы

Введение

Эффективная работа крупногабаритных оптических телескопов во многом определяется правильным выбором концепции построения и минимизацией влияния искажающих факторов на функционирование их систем.

Концепция построения телескопа в первую очередь зависит от выбора оптической схемы, обеспечивающей формирование оптического излучения и изображения с минимальными потерями энергии и информации, а также от выбора конструкции, отвечающей требованиям по прочностным, жесткостным и стабилизационным характеристикам в реальных условиях действия телескопа. При этом, концепция построения крупногабаритных телескопов, как было показано в работе [1], безусловно включает использование методов и средств адаптивной оптики.

Бюджет ошибок для выбранной концепции показывает возможные пути минимизации влияния искажающих факторов и определяет технические решения задачи функционирования телескопа и его систем. Остаточные ошибки устраняются средствами адаптивной коррекции фазовых искажений оптического излучения.

Практическое использование методов и средств адаптивной оптики в крупногабаритном телескопостроении у нас в стране началось с 1974 года. В это время в ГУП «НПО Астрофизика» было создано специальное подразделение, занимающееся разработкой и созданием адаптивных крупногабаритных оптических систем формирования и доставки энергии мощного лазерного излучения для лазерных локационных комплексов обнаружения и функционального подавления космических объектов.

В работе [2] известный российский ученый в области атмосферной адаптивной оптики профессор Лукин В.П. дает широкую картину становления и развития адаптивных средств как у нас, так и за рубежом. При этом, лидирующая роль в разработке адаптивных средств коррекции искажений, на мой взгляд, незаслуженно приписывается американцам. Американцы, конечно, люди деловые и хорошо организованы, но работы по адаптивной оптике в этот период они развернули в основном «на лабораторных столах», а широко разрекламированный проект многозеркального телескопа (ММТ) закончился неудачей по причине ошибочности выбранной концепции построения телескопа. Суть ошибочности концепции заключалась в том, что вместо сложения фаз излучения во входной апертуре телескопа, складывались амплитуды в фокальной плоскости. Ну а поскольку американцы очень не любят признаваться в ошибках, то втихую под тем же названием ММТ разработали новый проект, в который вдохнули новую концепцию 6,5-метрового сплошного зеркала.

За этот период в ГУП «НПО Астрофизика» под научным руководством автора были выполнены следующие основные работы в области создания адаптивных оптических систем для информационных и лазерных локационных комплексов:

1. Впервые в мире (1978 г.) (спустя 2 года после введения в эксплуатацию самого крупного в мире на тот момент 6-ти метрового телескопа БТА) силами специалистов ГУП «НПО Астрофизика» с участием кооперации (ЛОМО, КрАО АН СССР, ЦНИИАГ, ГОИ им.С.И.Вавилова, ИОА СО АН СССР и др.) был создан, успешно прошел испытания и введен в эксплуатацию адаптивный оптический телескоп АСТ-1200 с шестизлементным составным управляемым главным зеркалом диаметром 1.2 метра.

2. В рамках научно-исследовательских работ по теме «Вега-АН» силами ИКИ АН СССР (лаборатория академика Прохорова А.М.), ГУП «НПО Астрофизика» и КрАО АН СССР был создан адаптивный телескоп с адаптивной коррекцией общего наклона волнового фронта излучения (Патент SU 1205101).

3. Впервые в 1985 году был создан и прошел испытания экспериментальный образец лазерного (твердотельного) космического комплекса функционального подавления (ЭК-00) с формирующей оптической системой (диаметр главного зеркала 0,8 м).

4. Впервые в 1989 году был создан, успешно прошел испытания и демонстрационные эксперименты полномасштабный комплексный стенд (КС) формирования и доставки энергии мощного лазерного излучения (СО₂-лазер) на удаленный объект (~500 м) с адаптивной оптической телескопирующей системой (дифракционного качества) (СТ-1800) с 18-элементным составным управляемым главным зеркалом диаметром 1.8 метра.

5. Разработаны и промакетированы в основных узлах проекты крупногабаритных адаптивных оптических телескопов 10...25 метрового класса для наблюдения и локации космических объектов через турбулентную атмосферу.

1. Основные проблемы создания крупногабаритных оптических телескопов

Развитие крупногабаритного оптического телескопостроения во многом определяется уровнем технологических возможностей в реализации научно-технических идей. Здесь надо иметь в виду три направления.

Первое – концепция построения телескопа, включающая выбор оптимального диаметра главного зеркала, оптической схемы, состава аппаратуры, обеспечивающей работоспособность телескопа в реальных условиях действия.

Второе – обоснование и выбор принципов построения функциональных средств, входящих в состав аппаратуры, позволяющих получить предельно возможные характеристики телескопа. Критерием эффективности телескопа при этом может служить предложенный в работе [3] инвариант информативности. К функциональным средствам, в частности, относится система контроля пространственного положения оптических элементов (сегментов) составного главного зеркала (СГЗ) телескопа, система сохранения юстировки оптической системы в реальном времени (система автоматической стабилизации), система адаптивной коррекции искажений волнового фронта принимаемого излучения, система приводов микроперемещений, опорно-поворотное устройство и корпус телескопа и др.

И, наконец, третье направление – разработка технологий изготовления элементов и устройств выбранных функциональных средств.

В работе [4] было показано, что с ростом диаметра главного зеркала и уменьшением размера изображения объекта количество информации будет расти. Уменьшение размера изображения возможно при минимизации воздействия искажающих факторов, в том числе и средствами адаптивной оптики. Однако, начиная с некоторого момента, дальнейшее увеличение количества информации применительно к данной концепции построения телескопа за счет увеличения диаметра зеркала и качества изображения становится физически невозможным. Это объясняется опережающим ростом влияния искажающих факторов технологического и инструментального характера при больших диаметрах главного зеркала.

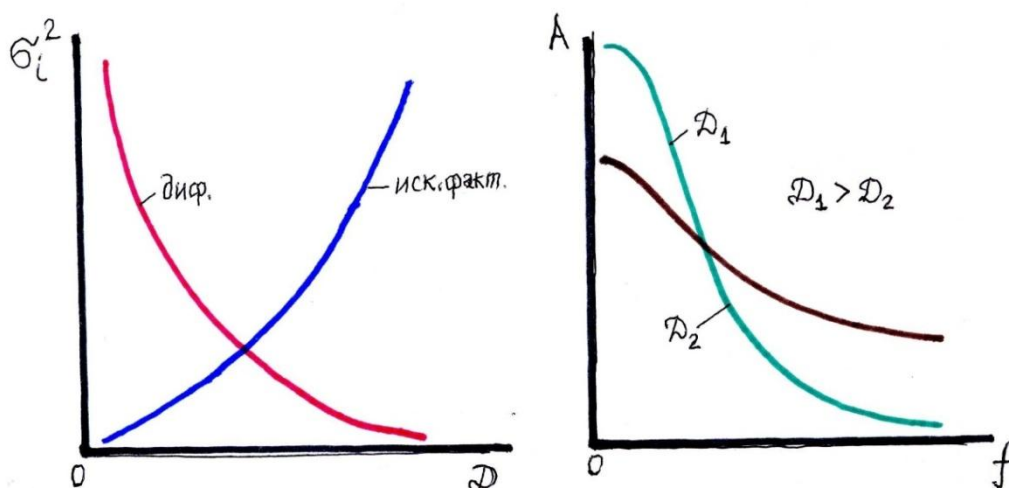


Рис.1. К вопросу об опережающем росте влияния и смещении частот флуктуаций искажающих факторов в низкочастотную часть спектра с увеличением диаметра зеркала.

σ_i^2 -дисперсия остаточных искажений, D -диаметр составного главного зеркала.

Поэтому существует диапазон значений "полезных" диаметров, при которых возможна реализация наилучшего качества телескопа. Достаточно очевидным является утверждение, что с увеличением диаметра зеркала, увеличивается воздействие искажающих факторов, за исключением дифракции (рис.1.). В качестве искажающих факторов в крупногабаритных телескопах выступают дифракция, фазировка элементов СГЗ, aberrации оптической системы, термдеформация оправ и конструкции, тепловые неоднородности в подкупольном пространстве, конвекция на поверхности зеркал, атмосфера как внутри оптического тракта, так и в свободной атмосфере, стабильность юстировки оптической системы, деформация элементов и конструкции (гнутия), вибрации, ошибки изготовления, ошибки автоматического привода, ошибки системы контроля.

2. Особенности оптической схемы телескопа АСТ-25.

Анализ бюджета ошибок показывает, что оптика крупных адаптивных телескопов вносит основной вклад в качество изображения. От правильного выбора оптической схемы, ее технологичности и коррекционных возможностей зависит достижение предельного качества изображения и его стабильности.

С ростом диаметра главного зеркала телескопа меняется подход к выбору и обоснованию оптической схемы телескопа. На первый план выступают требования по обеспечению заданного качества изображения и его стабильности, т.е. требования технологического характера.

Предложенная в АСТ-25 оптическая схема [5] обладает рядом достоинств, обеспечивающих высокое качество изображения в сочетании с технологичностью. Это оказалось возможным главным образом за счет того, что первая и вторая ступени оптической системы почти независимы за счет квазиафокальности первой ступени (рис.2.).

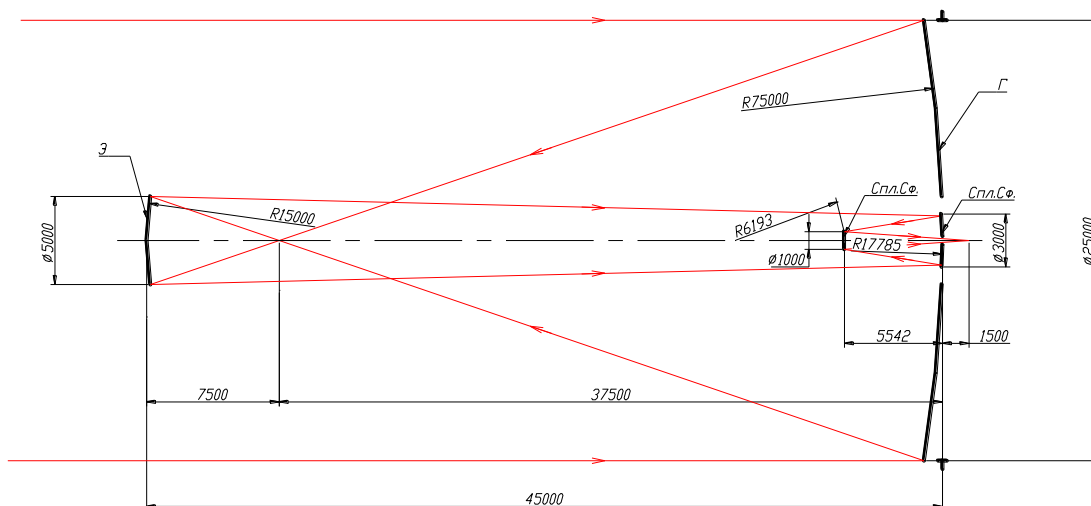


Рис.2. Оптическая схема АСТ-25

Благодаря этой особенности оптической схемы удалось получить практически дифракционное качество изображения в довольно широком для таких диаметров зеркала угловом поле 10 угл.мин. (рис.3.) [5].

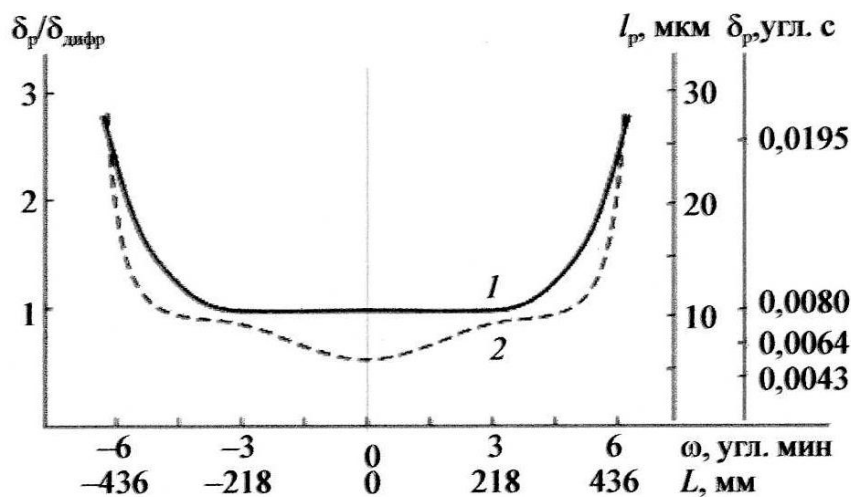


Рис. 3. Зависимости аберраций от углового и линейного полей. 1 – зависимость отношения кружка рассеяния точки в реальной δ_p и дифракционно-ограниченной $\delta_{дифр}$ оптических системах от углового ω и линейного L полей; 2 – зависимость размера изображения (по уровню $0,8E_0$) в линейной I_p и угловой мере δ_p от углового ω и линейного L полей.

Наличие погрешностей изготовления и сборки оптической системы с СГЗ приводит к возникновению дополнительных aberrаций, а, следовательно, к ухудшению качества изображения [6, 7]. Поэтому расчет допусков в процессе проектирования оптической системы является обязательным условием для получения технологичной конструкции системы, обеспечивающей ее изготовление на современном оборудовании.

Минимизация искажений не только позволит обеспечить нормальное функционирование телескопа, но и создать необходимые условия для эффективного использования средств адаптивной оптики [9]. Линейная адаптивная оптика наиболее эффективно работает с низкочастотными крупномасштабными фазовыми искажениями, поэтому она может взять на себя многие заботы по компенсации в реальном времени остаточных искажений волнового фронта регистрируемого телескопом излучения от объекта. Эти искажения вызваны недостаточной жесткостью и нестабильностью пространственных характеристик элементов конструкции и оптической системы.

3. Особенности системы контроля пространственного положения оптических элементов.

Ключевым узлом адаптивных средств телескопов с СГЗ является система контроля (СК) пространственного положения оптических элементов. Главное требование к ней – ее нерасстраиваемость, которую следует понимать как обеспечение стабильности пространственного положения оптических элементов телескопа во времени. Выбор СК является принципиально важным в реализации крупного телескопа.

Оригинальная схема контроля для телескопа с составным главным зеркалом была реализована в отечественном адаптивном телескопе АСТ-1200. Именно она положена в основу СК всех последующих разрабатываемых телескопов, в том числе и супертелескопа АСТ-25.

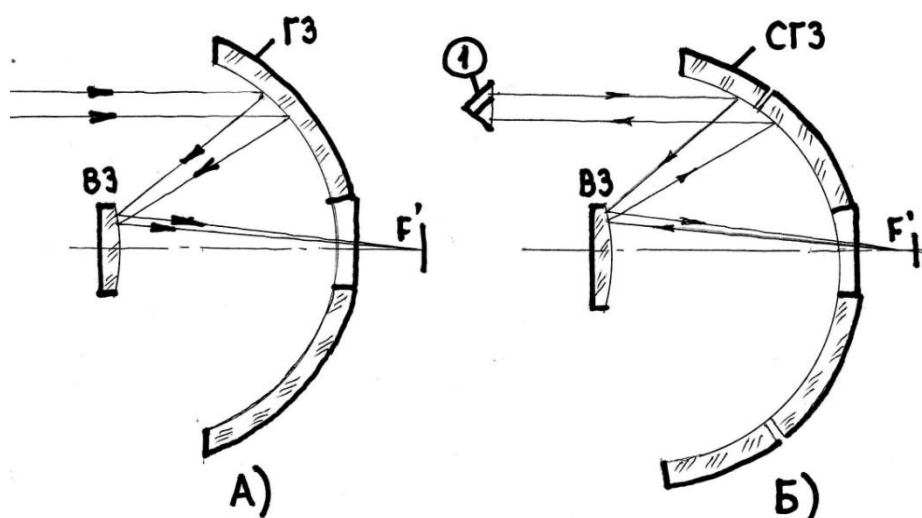


Рис.4. Схема контроля положения зеркал. А) схема со сплошным ГЗ, Б) схема с составным главным зеркалом (СГЗ), 1. – световозвращатель (трипель-призма), ВЗ - вторичное зеркало.

Основным достоинством этой схемы в режиме автоматической стабилизации элементов является нерасстраиваемость, которая обеспечивается размещением источника излучения и анализатора в эквивалентной фокальной плоскости вне поля и применением световозвращателей для переноса пучков контрольного излучения на элементы СГЗ.

Схема контроля работает следующим образом (рис.4). Если параллельный пучок излучения падает на сплошное главное зеркало (ГЗ) (схема А), то после прохождения оптического тракта оно соберется в точку в фокальной плоскости F' . Если же из этой точки направить луч в обратном направлении и вернуть его с помощью световозвращателя 1, то он придет в ту же точку. Ну а если теперь (схема Б) разрезать сплошное главное зеркало на отдельные элементарные зеркала (сегменты), то положение пришедшего в фокальную плоскость луча будет зависеть только от взаимного пространственного положения смежных зеркал.

По существу схема контроля взаимного углового положения элементарных зеркал реализует принцип псевдообращения. При этом выходящий и возвращенный пучки практически идут по одному и тому же пути с небольшим пространственным смещением, обеспечивая этим сначала отражение от опорной поверхности выходящего пучка, а затем – от измеряемой поверхности элементарного зеркала возвращенного пучка (рис.4).. Такая схема оказалась нечувствительной к любым другим погрешностям системы, кроме взаимного углового положения пары смежных зеркал.

4. Особенности конструкции телескопа

Монтировка телескопа (или опорно-поворотное устройство) предназначена для обеспечения ориентации оси телескопа в пространстве. Монтировка во многом определяет набор инструментальных факторов, ухудшающих качество изображения, даваемого оптикой телескопа. Кроме того, конструкция подвижной части телескопа должна обладать максимальным отношением жесткость/вес и минимальным отношением вес/диаметр. Это необходимо для повышения эффективности работы силового привода телескопа.

Во всех проектах крупных телескопов [8] применяется преимущественно альт-азимутальная монтировка. Анализ монтировок проектов крупногабаритных телескопов 4 поколения (Кеск, ММТ, VLT, JNLT-Subaru и т.д.) с точки зрения количества и величины инструментальных ошибок показал, что вилка является источником многих погрешностей, вызванных ее значительной массой и нестабильностью физико-механических свойств (деформации, вибрация, термодформации, наличие тепловых полей элементов конструкции вилки, неоптимальность распределения весовой нагрузки, приводящая к появлению концентраторов напряжений, и т.д.). Более предпочтительными в этом смысле являются "дисковые" монтировки.

Увеличение диаметра главного зеркала привело к необходимости поиска новых путей создания несущей конструкции, обеспечивающих получение оптимального

отношения жесткости механической конструкции к ее весу. Вместо массивных стальных конструкций, применявшихся в телескопах третьего поколения, стали применять облегченные пространственные ферменные структуры, обеспечивающие значительное снижение веса и температурной инерции.

Труба телескопа обеспечивает взаимную фиксацию пространственного положения элементов оптической системы. Она состоит из оптических элементов в оправках и собственно "трубы", на которой крепятся узлы оптических элементов. Традиционно труба выполняется в виде цилиндра. Главное зеркало крепится в нем с возможностью его юстировки и размещения научной аппаратуры. Вторичное зеркало закрепляется консольно в центре сечения входного отверстия трубы перед главным зеркалом на спайдерах.

Для защиты телескопа от воздействия внешних факторов, включая ветровые, в момент проведения наблюдений, а также поддержания температурной стабильности элементов оптики и конструкции телескопа на уровне температуры окружающей среды используется укрытие.

Укрытие традиционно является мощным источником искажений, влияющим на качество изображения, даваемого телескопом. Среди этих источников так называемый "павильонный эффект", возникающий в пространстве между укрытием и телескопом, неравномерность распределения температур вокруг телескопа и т.д.

Выход один – постараться избавиться от укрытия, а его функции возложить на "трубу" самого телескопа. Концепция супертелескопа АСТ-25 реализует именно такой подход к решению проблем.

Вибрации являются еще одним из существенных факторов, влияющих на качество изображения, формируемого телескопом.

Для уменьшения влияния вибраций на качество изображения необходимо повышать жесткость конструкции и, следовательно, резонансную частоту. Резонансная частота любой конструкции зависит от структуры корпуса. Чем жестче конструкция, тем выше резонансная частота.

В концепции корпуса телескопа АСТ-25 был использован принцип создания безрезонансных конструкций. Это оказалось возможным благодаря использованию методов гармонического спектрального анализа колебаний элементов и конструкции в целом.

Таким образом, концепция самой конструкции телескопа АСТ-25 основана на единстве конструкции трубы, монтировки и купола. Верхняя подвижная часть телескопа одновременно является "трубой" с закрепленными в ней компонентами оптической системы, "верхней опорой", позволяющей плавно менять ориентацию оси телескопа в

пространстве с помощью системы управления телескопом, а также "куполом", обеспечивающим защиту телескопа от воздействия внешней среды.

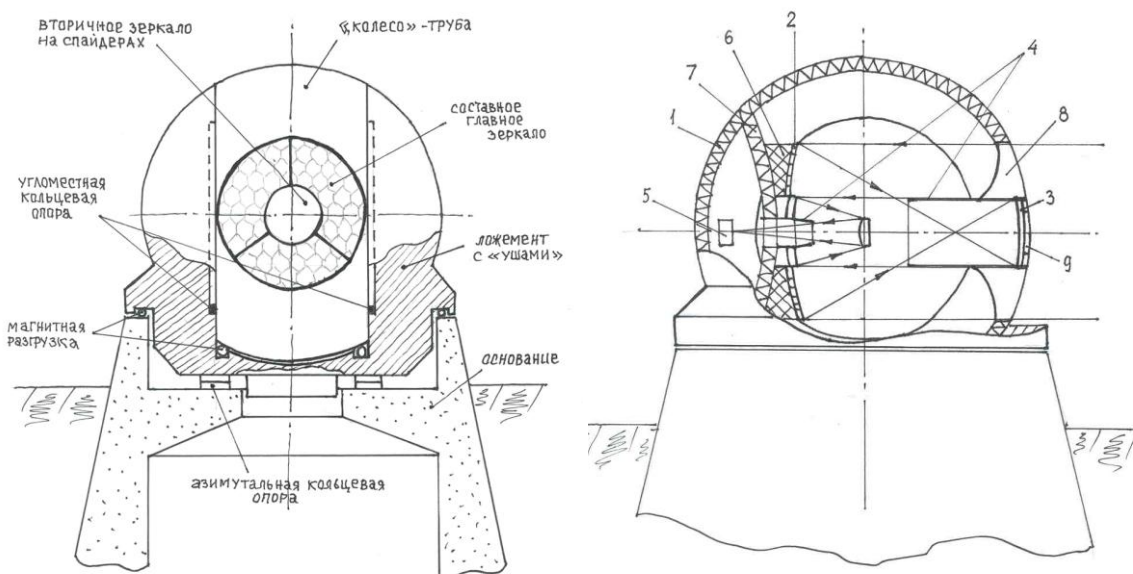
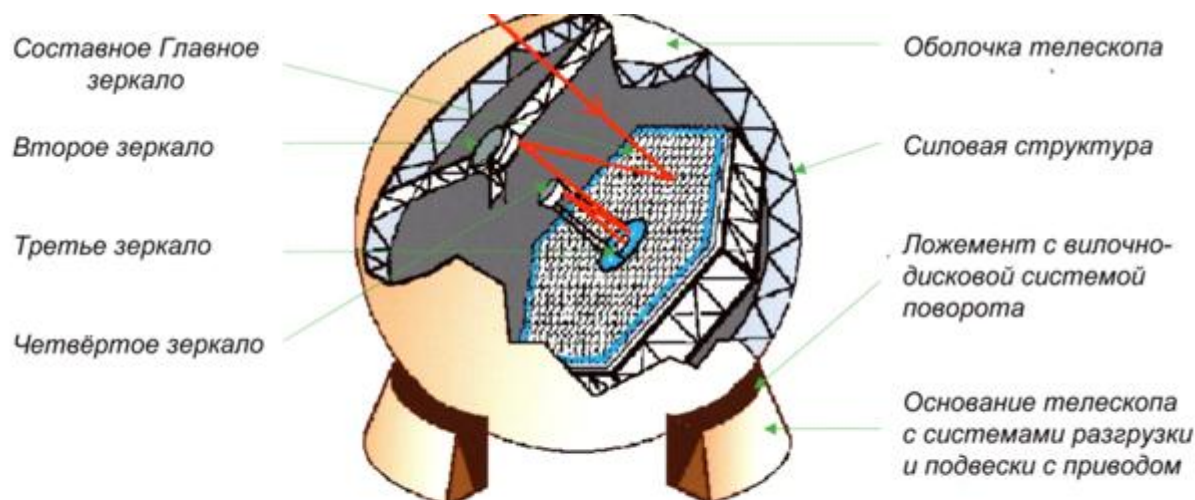


Рис. 5.Схема конструкции телескопа, раскрывающая концепцию построения телескопа АСТ-25.

1. Корпус подвижной части, 2. Составное главное зеркало, 3. Вторичное зеркало (ВЗ), 4. Бленда, 5. Приемно-регистрирующее устройство, 6. Оправа СГЗ, 7. Ребро жесткости, 8. Спайдеры, 9. Оправа ВЗ

Сразу снимается ряд проблем - исчезают искажающие факторы, присущие укрытию, снижается вес и стоимость комплекса, а также повышается надежность и упрощается его эксплуатация.

5. Новые технологии создания облегченных зеркал.

С ростом диаметра главного зеркала растет количество оптических элементов, из которых оно состоит. Изготовление нужного количества оптических элементов 1-метрового класса с высоким качеством для крупных телескопов традиционными методами растянется на многие годы (не менее 10 лет).

В концепции телескопа АСТ-25 использованы новые технологии изготовления зеркал [9], позволяющие без потери качества сократить сроки их изготовления.

Так, если вместо монолитной заготовки зеркала с его оправой и системой разгрузки оставить две тонкие пластины, поместив между ними (наподобие сэндвича) жесткую, легкую структуру, неразъемным образом скрепленную с этими пластинами, а затем заполнить ее термоизолирующим компаундом, то мы получим облегченную в 5..8 раз заготовку для зеркала высокого качества. По своим физико-механическим характеристикам она превосходит известные, позволяя достичь предельных оптических характеристик традиционными методами и средствами ее обработки. Такая технология значительно сокращает сроки изготовления зеркал (в ~ 3 раза), снижает стоимость (в ~ 2 раза), а также упрощает их установку и юстировку на общей оправе СГЗ.

6. Адаптивные средства коррекции искажений.

В телескопе АСТ-25 используются адаптивные средства, которые способны в пять раз уменьшить вклад искажений, вызванных атмосферной турбулентностью и которые способны исправлять крупномасштабные низкочастотные инструментальные погрешности, вызываемые конструкцией телескопа. Среднеквадратичный размер атмосферного уширения изображения был принят 0,5 угл.сек., что соответствует лучшим астроклиматическим условиям астрономических обсерваторий.

Для телескопов 25 - метрового класса ошибки, связанные с конструкцией телескопа и негативным влиянием ветровых нагрузок, имеют первостепенное значение. Так, в крупногабаритном оптическом телескопе имеется целый ряд трудноустраняемых причин, таких как гравитационные, тепловые и вибрационные деформации конструкции, переменные ветровые нагрузки и т.п., которые вызывают крупномасштабные низкочастотные искажения принимаемого излучения. А управляемое составное главное зеркало эффективно используется как компенсатор этих искажений в системе адаптивной коррекции.

Благодаря «ноу-хау» проекта супертелескопа АСТ-25, заключающемуся в ряде оригинальных технических решений в части

-новой концепции построения телескопа, позволившей исключить существенные искажающие факторы,

-«нерасстраиваемой» системы контроля пространственного положения элементов корректора,

-минимизации влияния искажающих факторов, существенно снижающей динамический диапазон этого влияния и повышающей точность адаптивной коррекции искажений,

-новой конструкции узлов крепления управляемых элементов корректора,

-новых приводов микроперемещений, у которых отсутствуют такие искажающие факторы как тепловые и электрические поля, вибрации, нежесткие элементы конструкции и т.д.

достигнуты предельно возможные характеристики крупногабаритного оптического телескопа, не достижимые никакими другими оптическими средствами, построенными на известных традиционных принципах.

Кроме того, отечественная концепция позволяет воспользоваться одним из наиболее эффективных, по нашему мнению, путей создания крупногабаритных телескопов, заключающимся в отказе от создания “абсолютно жесткой и нерасстраиваемой” конструкции, пассивно обеспечивающей отъюстированное состояние оптики телескопа в любом режиме работы. Конструкция должна лишь иметь остаточные деформации такого уровня, влияние которых в состоянии эффективно скомпенсировать адаптивная система, использующая в качестве корректора элементы СГЗ, а также управляемое вторичное зеркало.

Такая адаптивная система, прежде всего, предназначена для компенсации в реальном времени определенного спектра систематических и случайных возмущений, охватываемых ее диапазоном, пространственным разрешением и быстроедействием.

7. Пути совершенствования концепций построения оптических телескопов.

Уже сегодня можно утверждать, что единственный возможный путь решения задачи создания крупных телескопов 25-метрового класса - использование составных управляемых элементов (сегментов) главного зеркала и совершенствование конструкции и технологий.

Системный подход при разработке 25-метрового адаптивного телескопа АСТ-25 позволил, опираясь на комплексный анализ "бюджета ошибок" и на адаптивные возможности составного главного зеркала, компенсировать в первую очередь

низкочастотные инструментальные ошибки. Это оказалось возможным благодаря перераспределению традиционной структуры допусков и новому нетрадиционному решению общей конструкции телескопа.

На сегодняшний день предпочтительной концепцией создания супертелескопа 25-метрового класса, по нашему мнению, является концепция телескопа АСТ-25. Постепенно в мире происходит осознание этого факта и сближение позиций по ряду существенных вопросов, например, в части размера оптических элементов, необходимости адаптивных средств для получения качественных изображений, ряда конструктивных и технологических решений.

В целом на сегодняшний день по своим физико-механическим и информационным характеристикам отечественный телескоп АСТ-25, по нашему мнению, является самым легким, самым жестким, самым простым, самым дешевым, самым надежным телескопом в мире среди аналогичных созданных и разрабатываемых крупных телескопов.

8. Оценка технологического уровня разработки проекта

Высокие характеристики телескопа АСТ-25 обеспечиваются выбранной концепцией построения, решением ряда технических проблем и высоким уровнем технологического обеспечения. Среди этих проблем можно отметить создание

- облегченных жестких конструкций,
- эффективной оптической схемы с составным главным зеркалом,
- эффективной нерасстраиваемой системы контроля оптики,
- безредукторного многодвигательного силового привода с электрическим торсионом,
- прецизионного привода микроперемещений зеркал,
- упрощенной системы разгрузки,
- новой технологии изготовления оптических элементов
- системы адаптивного управления на основе нейрокомпьютерной техники.

Оценивая в сопоставлении основные технико-экономические характеристики оптических телескопов, можно констатировать достаточно высокий уровень отечественных разработок (см. таблицу). В число критериев оценки входят значения, характеризующие технологический уровень разработок. Среди них

- удельная информативность телескопа $\xi_{\text{реал}}/\text{м}^2$ – величина, характеризующая количество получаемой информации на единицу приемной площади главного зеркала,
- удельная масса ($\text{т}/\text{м}^2$) – величина, характеризующая массу подвижной части телескопа на единицу приемной площади главного зеркала,
- удельная стоимость ($\text{тыс.}\$/\text{м}^2$) – величина, характеризующая стоимость единицы приемной площади главного зеркала телескопа,
- удельная стоимость ($\text{тыс.}\$/\text{т}$) – величина, характеризующая стоимость единицы массы подвижной части телескопа.

Таблица

Телескоп	Площадь главного зеркала, м^2	Вес подвижной части, т	Удельная масса, $\text{т}/\text{м}^2$	Удельная стоимость тыс. $\$/\text{м}^2$	Удельная стоимость тыс. $\$/\text{т}$	Удельная информативность $\xi_{\text{реал}}/\text{м}^2$
АСТ-1200 (СССР)	1,1 ($\varnothing$ 1.2м)	1,7	1,55	1290	1176	0,072
WHT (Англия)	13,8($\varnothing$ 4.2м)	186	13,5	2028	150,5	278,91
Haile (США)	20 ($\varnothing$ 5м)	530	26,5	1250	47	
БТА (СССР)	28 ($\varnothing$ 6м)	850	30,35	1000	33	
Gemini (США)	50 ($\varnothing$ 8,1м)	315	6,3	5000	793	56,32
JNLT (Япония)	54 ($\varnothing$ 8,3м)	300	5,56	5500	990	
Keck,Keck II (США)	78 ($\varnothing$ 10м)	270	5,76	4500	1300	211,54
АСТ-10 (Россия)	79 ($\varnothing$ 10м)	250	3,16	890	281	208,86
LBT (США)	110,8($\varnothing$ 8,4х2)	580	5,23	2256	431	
CFHT (Кан. Фр. США)	113($\varnothing$ 12м)	290	2,56	654	255	
VLT (Зап.Европа)	211($\varnothing$ 8,2х4)	253х4	4,8	1420	296	
NORDIC (Шв.Фр.Дан.)	550($\varnothing$ 25м)	~3000	5,45	178		
АСТ-25 (Россия)	550($\varnothing$ 25м)	1000	1,8	180	99	976,57
CELT	706($\varnothing$ 30м)			425		65,68
GSMT (AURA)	706($\varnothing$ 30м)	1800	2,54	495	194	65,68
Euro50	1962($\varnothing$ 50м)			366		6,17
OWL(ESO)	7850($\varnothing$ 100м)			153		1,56

Из таблицы и графика видно, что по критерию удельной информативности впереди всех проекты телескопов АСТ-25 (25м), WHT (4,2м) и Keck (10м). Стоит задуматься, в чем-то Keck-телескоп недорабатывает, если дал себя опередить телескопу WHT с меньшей апертурой. Телескопы CELT (30м) и GSMT (30м) [10, 11] по этому критерию оказались на 5 и 6 местах, хотя по реальному количеству информации они входили в первую тройку телескопов [3]. Что касается проектов Euro50 (50м) и OWL (100м), то их возможности оказались на уровне 1.5 метровых апертур, что еще раз свидетельствует о нецелесообразности их реализаций.

А как обстоят дела по другим критериям? В таблице красным цветом отмечены первые три места по каждому из критериев. Результаты говорят сами за себя. Комментарии излишни.

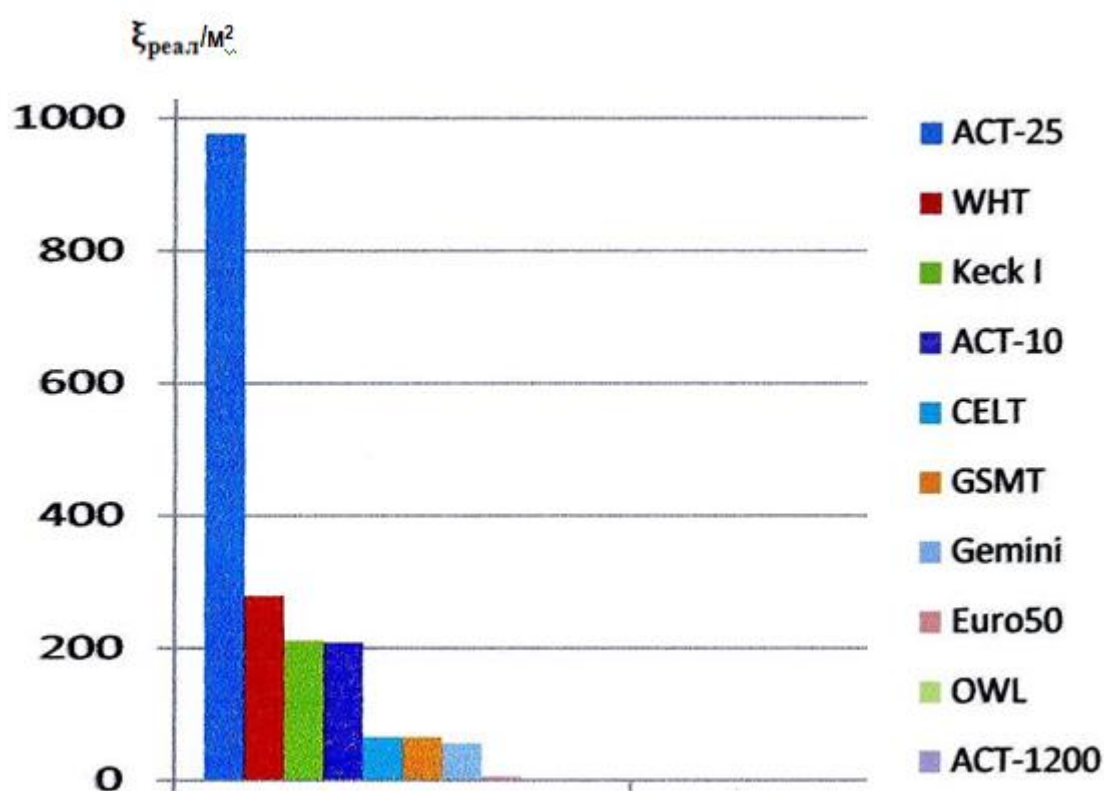


Рис.6. Гистограмма удельной информативности некоторых известных телескопов.

9. Заключение

Рассмотренный материал дает ясное понимание роли технологических аспектов в разработке таких сложных оптико-электронных комплексов, каковым является крупногабаритный оптический телескоп. Предложенные в статье технологические критерии оценки, такие как удельная информативность телескопа, удельная масса телескопа и удельная стоимость позволяют выявить слабые места в разработке проекта и определить резерв в части дальнейшего совершенствования телескопа.

Анализ результатов и их осмысление показало, что совершенствование оптических телескопов большого диаметра с позиций их максимальной информативности следует осуществлять путем улучшения технологий, реализующих оптимальные технические решения. Опыт прежних разработок подсказывает, что их надо искать на путях

- максимального устранения количества искажающих факторов,
- минимизации искажающего воздействия факторов, в том числе методами и средствами адаптивной оптики,
- выравнивания воздействия от различных факторов за счет перераспределения допусков.

Научно-техническая информация, изложенная в данной статье, выводы и рекомендации, надеюсь, будут полезны при разработке перспективных проектов оптических телескопов.

Список литературы

1. Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении: монография. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2005. 464 с.
2. Лукин В.П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // Успехи физических наук. 2014. Т. 184, № 6. С. 599-639.
3. Сычев В.В. К вопросу об эффективности крупногабаритных оптических телескопов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 1. DOI: [10.7463/0115.0754723](https://doi.org/10.7463/0115.0754723)
4. Sychev V.V., Belkin N.D., Deulin E.A. Problems in designing the 25-m-class supertelescope // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4004. P. 330-339. DOI: [10.1117/12.393939](https://doi.org/10.1117/12.393939)
5. Сычев В.В., Касперский В.Б., Машинина М.Л. Оптическая система адаптивного 25-метрового телескопа с составным главным зеркалом из сферических сегментов // Оптический журнал. 2007. Т. 74, № 2. С. 19-23.
6. Зверев В.А., Бахолдин А.В., Гаврилюк А.В. Оптическая система высокоапертурного телескопа // Оптический журнал. 2001. Т. 68, № 6. С. 6-14.
7. Бахолдин А.В., Зверев В.А., Романова Г.Э. Оптическая система высокоапертурного телескопа // Оптический журнал. 2005. Т. 72, № 2. С. 24-28.
8. Nelson J.E. Design Concept for the California Extremely Large Telescope (CELT) // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4004. P. 282-290. DOI: [10.1117/12.393933](https://doi.org/10.1117/12.393933)
9. Sychev V.V., Pechenov A.S. Adaptive system of the AST-25 // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4007. P. 1108-1113. DOI: [10.1117/12.390316](https://doi.org/10.1117/12.390316)
10. Сычев В.В. Метод изготовления облегченных оптических элементов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 4. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/415359.html> (дата обращения 01.01.2015).
11. Dierickx P., Gilmozzi R. Progress of the OWL 100-m Telescope Conceptual Design // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4004. P. 290-299. DOI: [10.1117/12.393934](https://doi.org/10.1117/12.393934)

Technological Aspects of Creating Large-size Optical Telescopes

V.V. Sychev^{1,*}

[*viktorsychev@list.ru](mailto:viktorsychev@list.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: large optical telescopes, informativeness criterion, adaptive optical systems, the distorting factors

A concept of the telescope creation, first of all, depends both on a choice of the optical scheme to form optical radiation and images with minimum losses of energy and information and on a choice of design to meet requirements for strength, stiffness, and stabilization characteristics in real telescope operation conditions. Thus, the concept of creating large-size telescopes, certainly, involves the use of adaptive optics methods and means.

The level of technological capabilities to realize scientific and engineering ideas define a successful development of large-size optical telescopes in many respects. All developers pursue the same aim that is to raise an amount of information by increasing a main mirror diameter of the telescope.

The article analyses the adaptive telescope designs developed in our country. Using a domestic ACT-25 telescope as an example, it considers creation of large-size optical telescopes in terms of technological aspects. It also describes the telescope creation concept features, which allow reaching marginally possible characteristics to ensure maximum amount of information.

The article compares a wide range of large-size telescopes projects. It shows that a domestic project to create the adaptive ACT-25 super-telescope surpasses its foreign counterparts, and there is no sense to implement Euro50 (50m) and OWL (100m) projects.

The considered material gives clear understanding on a role of technological aspects in development of such complicated optic-electronic complexes as a large-size optical telescope. The technological criteria of an assessment offered in the article, namely specific informational content of the telescope, its specific mass, and specific cost allow us to reveal weaknesses in the project development and define a reserve regarding further improvement of the telescope.

The analysis of results and their judgment have shown that improvement of optical large-size telescopes in terms of their maximum informational content should be provided by improving technologies based on the optimal engineering solutions. Experience of former developments shows that they could be found by the following ways:

- eliminating amount of distorting factors;

- minimizing influence of distorting factors, by using the adaptive optics methods and means as well;

- aligning effects, caused by various factors, owing to redistribution of tolerances.

The scientific and technical information stated in this article, conclusions, and advices can be useful when developing perspective projects of optical telescopes.

References

1. Sychev V.V. *Adaptivnye opticheskie sistemy v krupnogabaritnom teleskopostroenii* [Adaptive optical systems in bulky telescope-building]. Staryy Oskol, "Tonkie naukoemkie tekhnologii" Publ., 2005. 464 p. (in Russian).
2. Lukin V.P Adaptive optics in the formation of optical beams and images. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2014, vol. 184, no. 6, pp. 599-639. (English translation: *Physics-Uspekhi*, 2014, vol. 57, no. 6, pp. 556-592. DOI: [10.3367/UFNe.0184.201406b.0599](https://doi.org/10.3367/UFNe.0184.201406b.0599)).
3. Sychev V.V. Revisiting the Effectiveness of Large Optical Telescopes. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 1. DOI: [10.7463/0115.0754723](https://doi.org/10.7463/0115.0754723) (in Russian).
4. Sychev V.V., Belkin N.D., Deulin E.A. Problems in designing the 25-m-class supertelescope. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4004, pp. 330-339. DOI: [10.1117/12.393939](https://doi.org/10.1117/12.393939)
5. Sychev V.V., Kasperskiy V.B., Mashinina M.L. The optical system of an adaptive 25-m telescope with a composite primary mirror composed of spherical segments. *Opticheskiy zhurnal*, 2007, vol. 74, no. 2, pp. 19-23. (English translation: *Journal of Optical Technology*, 2007, vol. 74, no. 2, pp. 90-93. DOI: [10.1364/JOT.74.000090](https://doi.org/10.1364/JOT.74.000090)).
6. Zverev V.A., Bakhholdin A.V., Gavriluk A.V. Optical system of a high-aperture telescope. *Opticheskiy zhurnal*, 2001, vol. 68, no. 6, pp. 6-14. (English translation: *Journal of Optical Technology*, 2001, vol. 68, no. 6, pp. 381-387. DOI: [10.1364/JOT.68.000381](https://doi.org/10.1364/JOT.68.000381)).
7. Bakhholdin A.V., Zverev V.A., Romanova G.E. The optical system of a very large telescope. *Opticheskiy zhurnal*, 2005, vol. 72, no. 2, pp. 24-28. (English translation: *Journal of Optical Technology*, 2005, vol. 72, no. 2, pp. 182-185. DOI: [10.1364/JOT.72.000182](https://doi.org/10.1364/JOT.72.000182)).
8. Nelson J.E. Design Concept for the California Extremely Large Telescope (CELT). *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4004, pp. 282-290. DOI: [10.1117/12.393933](https://doi.org/10.1117/12.393933)
9. Sychev V.V., Pechenov A.S. Adaptive system of the AST-25. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4007, pp. 1108-1113. DOI: [10.1117/12.390316](https://doi.org/10.1117/12.390316)
10. Sychev V.V. Method of manufacturing of the lightened optical elements. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 4. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/415359.html> , accessed 01.01.2015. (in Russian).
11. Dierickx P., Gilmozzi R. Progress of the OWL 100-m Telescope Conceptual Design. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4004, pp. 290-299. DOI: [10.1117/12.393934](https://doi.org/10.1117/12.393934)