

УДК 681.786.42

Разработка атермализованного объектива для системы контроля крупногабаритных объектов

© 2020 г. **Р. И. Миннигазимов, аспирант; С. С. Митрофанов, канд. техн. наук**

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: rikos111@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.04.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-04-36-43

Данная работа посвящена решению одной из задач, которая возникает при проектировании контрольно-измерительных систем, работающих в широком температурном диапазоне, а именно, решение задачи, связанной с температурной расфокусировкой оптических узлов систем под действием окружающей среды. Атермализацию проводят различными методами. Одни из них компенсируют терморасфокусировку, а другие компенсируют деформации и смещения оптических и конструктивных параметров из-за изменения температуры. Для обеспечения высокой степени атермализации в работе применялись методы из обеих групп. Получены результаты проектирования и разработки атермализованной оптической системы, включающие в себя объектив и фотоприёмник в едином корпусе, для применения в устройствах контроля смещения гидродинамических сооружений, работающих в широком температурном диапазоне.

Ключевые слова: атермализация объектива, контрольно-измерительные системы, проектирование оптических систем, триангуляция, контроль положения, гидротехнические сооружения.

Коды OCIS: 220.4610.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире метод лазерной триангуляции всё больше применяется при создании систем размерного контроля прецизионного качества. Контрольно-измерительные датчики, в основе работы которых лежит метод лазерной триангуляции, позволяют решать задачи размерного контроля с погрешностями, не превышающими сотен микрон в диапазоне измерений до одного метра.

Одна из задач, решаемая контрольно-измерительными датчиками, является контроль за состоянием несущих конструкций плотин гидротехнических сооружений. Согласно ФЭ № 117 от 21.07.97 г. «О безопасности гидротехнических сооружений» контроль за плановым смещением осуществляется посредством измерения смещения контрольных точек верти-

кальных струнных отвесов от положения их начального состояния [1].

В настоящее время в качестве средств измерения положения струны применяются системы визуального контроля и/или системы автоматизированного контроля с применением фотоэлектрических преобразователей. Последние обладают высокой точностью проводимых измерений, автоматизированы, однако имеют высокую стоимость и ограниченный рабочий диапазон температур. Системы визуального контроля, представлены, главным образом, визуальными измерителями, построенными по схеме Катгырева–Брехмана. Недостатками данных контрольно-измерительных систем является большой вес и размеры, а также невысокая точность, связанная с ошибками снятия отсчётов оператором [2].

Несмотря на существенные недостатки, системы визуального контроля применяются для контроля за плановыми смещениями на грунтовых плотинах, построенных в северных строительного-климатических зонах. Это объясняется тем, что в отличие от фотоэлектрических преобразователей, визуальные измерители могут эксплуатироваться при отрицательных температурах, сохраняя требуемую точность измерения.

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что необходима разработка контрольно-измерительной системы, обладающей высокой точностью работы, а также устройство должно иметь широкий температурный диапазон эксплуатации, производить измерения в двух плоскостях с одной установки, обладать малыми габаритами, весом и должно быть автоматизировано. Разработка данного устройства позволит производить более точные контрольно-измерительные операции в автоматизированном режиме на гидротехнических сооружениях вне зависимости от того, где и по какому типу они построены.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве метода определения планового смещения гидродинамических сооружений был выбран метод струнных отвесов. Данный метод предполагает осуществление контроля по внутренним контрольно-измерительным сетям при помощи вертикально отвесных струн. Смещение тела конструкции гидродинамического сооружения влечёт за собой смещение струны отвеса от номинального положения. Измеренное численное значение смещения струны в двух плоскостях показывает поперечное и продольное смещение конструкции гидродинамического сооружения [3].

В качестве метода определения смещения струны был выбран триангуляционный метод определения расстояния. Преимуществами данного метода является простота реализации контролирующей системы, а также возможность обеспечения прецизионной точности определения расстояния до струны при измерении на небольших дистанциях.

Триангуляционная контрольно-измерительная система, представленная на рис. 1, состоит из блока осветителя 1 и блока фотоприём-

ного устройства 2. Создаваемое осветителем 1 излучение, освещает струну отвеса 3 (на рис. 1 показано два положения струны). Отражённое от струны излучение попадает в блок фотоприёмного устройства 2, где фокусирующий объектив 4 проецирует отражённое излучение на многоэлементный фотоприёмник 5.

Блок фотоприёмного устройства располагается под некоторым углом триангуляции α к оптической оси осветителя, таким образом, чтобы осветитель, струна отвеса и фотоприёмник образовывали треугольник. Смещение струны Δh связано со смещением её изображения p на фотоприёмнике как [4]

$$\Delta h = f'p / (Mp \cos(2\alpha) + f'M^2 \cos(2\alpha)) \times \sqrt{(M^2 + \tan^2(2\alpha)) / M^2}, \quad (1)$$

где M — увеличение, f' — заднее фокусное расстояние объектива 4.

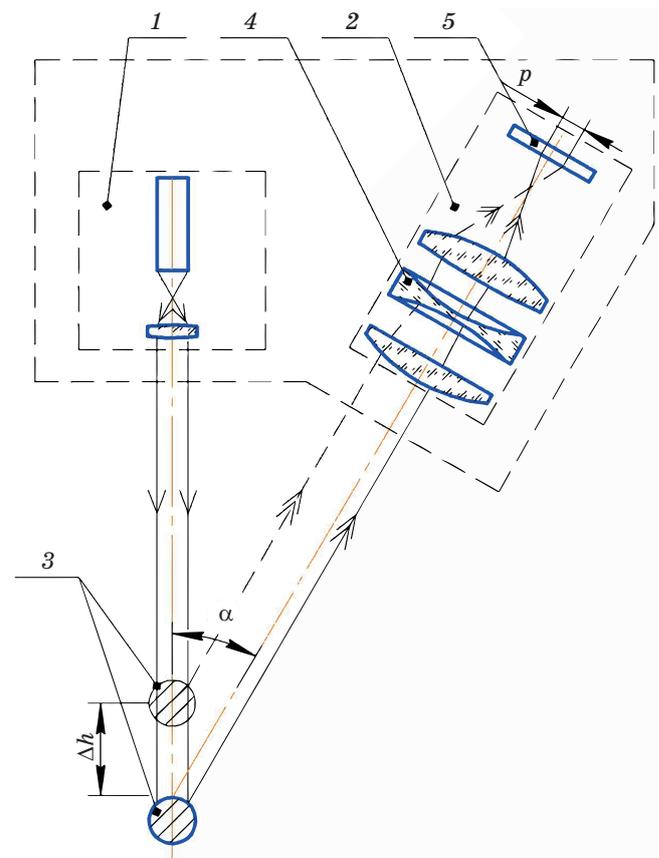


Рис. 1. Схема контрольно-измерительной триангуляционной системы. p — смещение светового пятна на ФП, Δh — смещение струны, α — угол триангуляции.

Анализируя выражение (1), можно определить погрешность измерения положения струны $\Delta h_{\Delta f}$, из-за изменения фокусного расстояния f' продифференцировав его,

$$\Delta h_{\Delta f} = ((Mp \cos(2\alpha)) / (Mp \cos(2\alpha) + f' M^2 \cos(2\alpha)) \times \sqrt{(M^2 + \tan^2(2\alpha)) / M^2}) \Delta f'. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что смещение струны отвеса, рассчитанное по координатам изображения p на фотоприёмнике, зависит от увеличения M и заднего фокусного расстояния f' . Линейное увеличение объектива также зависит от фокусного расстояния. Здесь видно, что связь смещения струны Δh со смещением её изображения на фотоприёмнике p зависит главным образом от фокусного расстояния объектива f' , а точнее от неизменности данного параметра под действием окружающей среды.

Изменение внешних условий эксплуатации, в частности, изменение температуры, оказывает влияние на все элементы системы, как на оптические, так и на конструктивные: изменяются радиусы сферических поверхностей и толщины оптических элементов, изменяется показатель преломления оптических материалов, из-за линейного расширения металлов изменяются воздушные промежутки. Влияние всех этих факторов приводит к изменению фокусного расстояния объектива, и, как следствие, к сдвигу плоскости наилучшей установки, т.е. происходит температурная расфокусировка.

Существуют различные методы компенсации температурной расфокусировки. Разделив различные методы атермализации на две большие группы по выполняемым функциям получим компенсаторы терморасфокусировки и компенсаторы деформаций и смещений [5]. Из методов компенсации терморасфокусировки следует выделить методы оптической атермализации, механической атермализации и метод адаптивного конструирования. Метод оптической атермализации заключается в проектировании оптической системы, в которой определённые комбинации оптических элементов, их материалов и конструктивных параметров компенсируют расфокусировку оптической системы из-за изменения температуры. Условием атермализации [6] оптической системы с фокусным расстоянием f'_{os} ,

состоящей из n элементов, является выполнение соотношения

$$\Delta f'(T)_{os} = \sum_{i=1}^n \Delta f'(T)_i = 0, \quad (3)$$

где $\Delta f'(T)_i = -f'(T)_i / (((\beta_i/n_i - 1) - \alpha_i) \Delta T)$.

Здесь n_i — показатель преломления материала, β_i — температурный коэффициент показателя преломления n_i , α_i — ТКЛР материала оптического элемента, ΔT — изменение температуры окружающей среды.

К недостатку данного метода атермализации следует отнести, что выполнение соотношения (3) на практике редко удаётся выполнить равным нулю. Связано это с тем, что не всегда получается подобрать оптические материалы с разными термооптическими коэффициентами [7]. Подбор материалов ограничивается набором существующих оптических материалов, а также зависит от конкретных особенностей материала, как например, токсичности некоторых марок стёкол, высокой цены материала и т.д.

Метод механической атермализации заключается в разработке конструкции оптического прибора, которая при изменении температуры компенсирует смещение плоскости наилучшей установки путём изменения линейных размеров конструктивных элементов оптической системы.

В основе данного метода компенсации лежит уравнение изменения длины элемента от температуры

$$l(t) = l + (l\alpha_m(t - t_0)), \quad (4)$$

где t — конечная температура, t_0 — начальная температура, $l(t)$ — длина элемента при температуре t , l — длина элемента при начальной температуре, α_m — ТКЛР материала.

Отсутствие расфокусировки, а также её степень, зависит от выбора рассчитанных конструктивных элементов оптической системы. Как правило, на практике, такие компенсаторы устанавливаются между оптической системой и фотоприёмным блоком, обеспечивая корректировку изменения заднего отрезка оптической системы. Смещение плоскости наилучшей установки (ПНУ) фотоприёмника, вызванное изменением температуры может быть, как отрицательным, так и положительным.

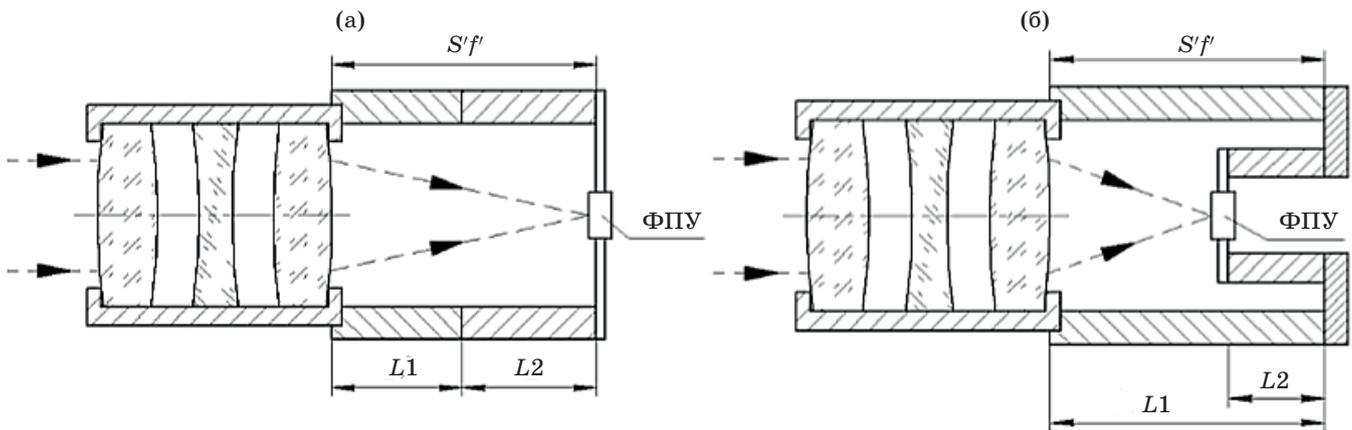


Рис. 2. Функциональные схемы атермализации оптической системы. (а) Увеличение заднего отрезка с изменением температуры, (б) уменьшение заднего отрезка с изменением температуры.

Поэтому выделяют две конструктивные схемы [8], позволяющие обеспечить корректировку смещения ПНУ фотоприёмника (см. рис. 2).

Основным недостатком данного метода атермализации в отличие от метода оптической (пассивной) атермализации является увеличение габаритов оптической системы вследствие увеличения линейных размеров конструктивных элементов оптического прибора. Однако, в то же время данный метод позволяет скорректировать большие по значению смещения ПНУ, в отличие от оптической атермализации, из-за большего выбора доступных конструктивных материалов элементов оптической системы с разным коэффициентом ТКЛР. Также стоит отметить, что данный метод позволяет корректировать большие смещения ПНУ путём использования материалов с высоким коэффициентом ТКЛР, например, у фторопласта марки 4С15 ТКЛР равен $\alpha_{fl} = 131 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ или использовать многокомпонентные компенсаторы.

Метод адаптивной конструкции заключается в проектировании оптического прибора, который корректирует смещение ПНУ путём перемещения отдельных блоков оптической системы при помощи шаговых двигателей или пьезотолкателей. Механизмы перемещения контролируются блоком управления, величина подвижек блоков оптической системы зависит от показаний датчиков температуры.

Основной недостаток данного метода — серьезное усложнение конструкции оптического прибора.

Для решения задачи по проектированию контрольно-измерительного устройства в целях исключения влияния терморасфокусировки нами был выбран метод механической атермализации, т.к. его реализация относительно проста, в отличие от метода адаптивной конструкции, и позволяет корректировать большие значения смещения ПНУ, в отличие от метода оптической атермализации. При проектировании оптической системы следует:

1. Выбрать фокусирующий объектив.
2. При помощи программного обеспечения (ПО) Zemax оценить влияние механических составляющих на сдвиг плоскости наилучшей установки. По возможности подобрать материалы механических узлов таким образом, чтобы сдвиг ПНУ находился в пределах дифракционной глубины резкости выбранного объектива.
3. В случае невозможности подобрать соответствующие материалы для механических узлов следует разработать конструкцию термокомпенсатора.

В качестве объектива для разрабатываемой контрольно-измерительной системы была использована оптическая схема объектива «Триплет-32» с фокусным расстоянием 45 мм, с диафрагменным числом 3,5 и угловым полем 57° , работающем на длине волны излучения 650 нм. Конструктивные параметры объектива, взятые из встроенной в ПО Oral библиотеки, представлены в табл. 1.

Конструктивно объектив оформлен как показано на рис. 3. Предлагается сделать конструкцию насыпной. Линзы 1, 2 и 3 распола-

Таблица 1. Конструктивные параметры объектива схемы «Триплет»

| Номер поверхности | Радиусы, мм | Осевые расстояния, мм | Высоты, мм | Марка стекла |
|-------------------|-------------|-----------------------|------------|--------------|
| 1 | 18,197 | 2,7 | 7,00 | ТК14 |
| 2 | 0,0 | 5,0 | 6,75 | Воздух |
| 3 | -22,08 | 0,7 | 5,25 | Ф1 |
| 4 | 18,03 | 4,2 | 5,15 | Воздух |
| 5 | 69,18 | 3,5 | 7,8 | ТК14 |
| 6 | -18,03 | | 8,00 | Воздух |

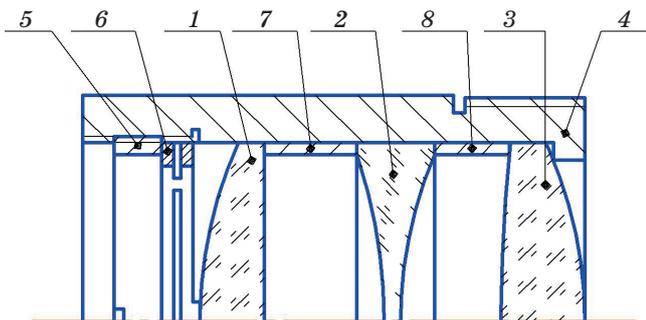


Рис. 3. Возможная конструкция объектива «Триплет».

гаются в корпусе 4. Фиксация линз в корпусе объектива обеспечивается резьбовым кольцом 5 через пружинное кольцо 6, которое компенсирует влияние температурных деформаций. Воздушные промежутки между линзами обеспечиваются промежуточными кольцами 7 и 8.

Увеличение объектива $M = 0,77$, угол триангуляции системы $\alpha = 20^\circ$ [9], фокусное расстояние $f' = 45$ мм, диапазон измерения координаты $p = -14$ – 14 мм. При серийном производстве погрешность фокусного расстояния объектива достигает 0,5–1% [10]. Выбрав объектив и используя выражение (2), можно вычислить возникающую погрешность измерения положения струны $\Delta h_{\Delta f}$ из-за изменения фокусного расстояния f' на 1%, которое составит

$$\Delta h_{\Delta f} = 19 \text{ мкм.} \quad (5)$$

В неатермализованном объективе «Триплет-32» изменение температуры в диапазоне -20 – 50°C приводит к изменению фокусного расстояния на 1,13%, что приводит к погрешности измерения положения струны в 21,4 мкм, а это больше дифракционной глубины резкости объектива, равной 15 мкм.

Смоделировав данную схему в ПО Zemax при температуре среды, равной 20°C , и угловом размере объекта исследования в 4° , используя в качестве осветителя лазер с длиной волны 650 нм, получим, что плоскость наилучшей установки располагается на расстоянии 40,35 мм от задней поверхности объектива. При этом радиус пятна рассеяния на плоскости фотоприёмника будет 19,23 мкм для осевого пучка и 30,9 мкм для пучка вне оси. Разрешающая способность на контрасте 0,3 составит 49 лин/мм для осевого пучка и 46 лин/мм для пучка вне оси.

Согласно ГОСТ Р 53340-2009 «Приборы геодезические. Общие технические условия» диапазон температур эксплуатации контрольно-измерительных систем с электронным режимом работы определяется от минус 20°C до плюс 50°C [11]. При таком большом диапазоне изменения температуры будут меняться радиусы кривизны, толщины, воздушные промежутки между линзами и показатели преломления стёкол линз, что приведёт к сдвигу ПНУ.

Для объективного исследования влияния температурных изменений на сдвиг ПНУ в расчёт следует добавить ТКЛР для промежуточных колец 7 и 8 (см. рис. 3). В качестве базового материала для промежуточных колец 7 и 8 был выбран алюминиевый сплав Д16Т с $\alpha_{\text{Д16Т}} = 22,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, также в качестве дополнительного рассматривались сплав 29НК с $\alpha_{\text{29НК}} = 4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и титан ВТ5 с $\alpha_{\text{ВТ5}} = 8,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Дополнительные материалы рассматривались, потому что имеют довольно низкий коэффициент ТКЛР, близкий к нулю. В итоге перебора материалов промежуточных колец была составлена табл. 2.

Из табл. 2 видно, что в лучшем случае, когда два промежуточных кольца изготовлены

Таблица 2. Сдвиг ПНУ объектива «Триплет-32» с учётом влияния конструктивных элементов оптической системы для точки, лежащей на оси

| Характеристики | Д16Т | | 29НК | | ВТ5 | |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | –20 °С | 50 °С | –20 °С | 50 °С | –20 °С | 50 °С |
| Температура | –20 °С | 50 °С | –20 °С | 50 °С | –20 °С | 50 °С |
| Задний отрезок S_f' , мм | 40,310 | 40,384 | 40,329 | 40,369 | 40,322 | 40,376 |
| Радиус пятна рассеивания, мкм | 19,82 | 18,13 | 18,39 | 18,93 | 18,22 | 18,75 |
| Разрешающая способность, лин/мм | 37,22 | 35,34 | 41,47 | 43,77 | 38,82 | 39,68 |

Таблица 3. Результаты оптимизации конструкции объектива «Триплет» с целью выбора ТКЛР промежуточных колец и заднего отрезка

| | Кольцо 7 | Кольцо 8 | Задний отрезок |
|---|----------|----------|----------------|
| Величина ТКЛР, 10^{-6} К^{-1} | –139,0 | –1065,5 | 184,2 |

из сплава 29НК смещение заднего отрезка составило 21 мкм при понижении температуры и 19 мкм при повышении температуры от номинальной, равной 20 °С. Стоит заметить, что данное смещение ПНУ больше дифракционной глубины резкости T_d объектива, рассчитанной по следующей формуле:

$$T_d = \lambda / 2A^2, \quad (6)$$

где λ — длина рабочей волны излучения оптической системы, A — апертура объектива.

Дифракционная глубина резкости объектива «Триплет-32» по выражению (6) равна $T_d = 15$ мкм, что меньше, чем сдвиг ПНУ. Из этого следует, что в результате изменения температуры будет наблюдаться ухудшение качества изображения на фотоприёмнике. Для решения данной задачи следует подобрать материалы для промежуточных колец с определёнными коэффициентами ТКЛР, таким образом, чтобы сдвиг ПНУ всего оптического прибора лежал в области дифракционной глубины резкости объектива. Для этого следует задать коэффициенты ТКЛР для промежуточных колец как переменные для того, чтобы при помощи оптимизатора ПО Zemax подобрать требуемые величины и затем выбрать материалы с близкими по величине ТКЛР. По результатам данного исследования были получены следующие результаты, представленные в табл. 3.

Как видно из табл. 3, материалов с полученными при оптимизации значениями ТКЛР не существует. Также при проведении данного

исследования было замечено, что изменение величины ТКЛР заднего отрезка существенным образом влияет на величины ТКЛР для колец 7 и 8 и изменение величины ТКЛР кольца 8 существенно влияет на величину ТКЛР кольца 7.

Исходя из вышесказанного, для реализации данной схемы было предпринято оставить в качестве переменной величину ТКЛР для заднего отрезка, а промежуточные кольца 7 изготовить из алюминиевого сплава Д16Т с $\alpha_7 = 22,6 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ и 8 изготовить из сплава 29НК с $\alpha_8 = 4,5 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. В результате проделанной оптимизации величина ТКЛР заднего отрезка получилась равной $\alpha_{\text{екв}} = -14,38 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам проведённого исследования была получена отрицательная величина ТКЛР $\alpha_{\text{екв}}$ для заднего отрезка. Подобрать материал, отвечающий полученным в результате исследования требованиям, невозможно, но решить проблему можно, спроектировав конструкцию термокомпенсатора для оптической системы [8], которая будет обеспечивать необходимое расстояние между объективом и фотоприёмником и при изменении температуры будет изменять свои линейные размеры по закону, полученному в результате оптимизации в ПО Zemax. Данная конструкция представлена на рис. 4.

На рис. 4 1 — основной корпус, изготовленный из латуни, 2 — промежуточное кольцо,

Таблица 4. Параметры оптической системы контрольно-измерительной системы

| | 20 °С | | –20 °С | | 50 °С | |
|---------------------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | На оси | Вне оси | На оси | Вне оси | На оси | Вне оси |
| Задний отрезок Sf' , мм | 40,35 | | 40,35 | | 40,35 | |
| Радиус пятна рассеивания, мкм | 18,78 | 31,67 | 18,52 | 29,99 | 18,81 | 31,87 |
| Разрешающая способность, лин/мм | 49,75 | 46,23 | 48,2 | 45 | 51,5 | 46,38 |

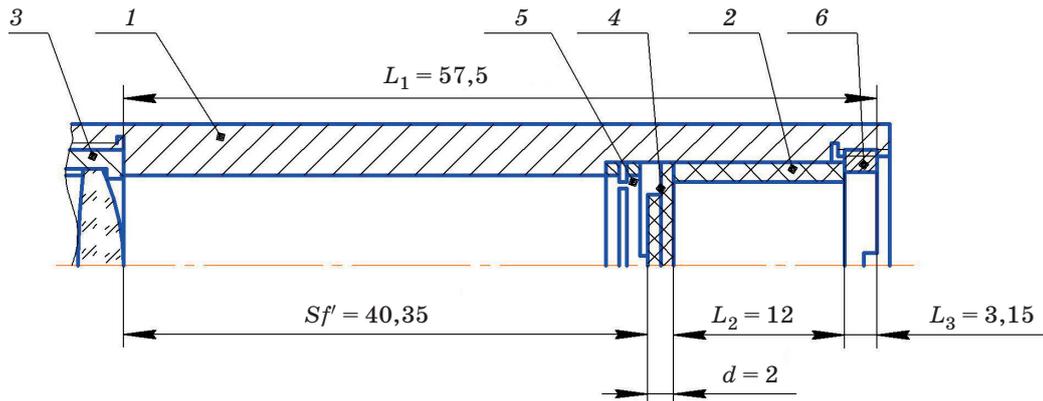


Рис. 4. Схема сборной конструкции фотоприёмника на ПЗС.

изготовленное из фторопласта 4С15, 3 — корпус объектива «Триплет», 4 — фотоприёмник на ПЗС, 5 — пружинное кольцо, 6 — резьбовое кольцо, изготовленное из алюминиевого сплава Д16Т.

Для проверки работоспособности данной конструкции сравним рассчитанное из закона функционирования значение ТКЛР для заднего отрезка объектива с полученным в процессе оптимизации в ПО Zemax. Значение ТКЛР, выведенное из закона функционирования $\alpha_{Sf'}$ сборной конструкции фотоприёмника на ПЗС при изменении температуры рассчитывается следующим образом:

$$\alpha_{Sf'} = (L_1\alpha_1 - L_3\alpha_3 - L_2\alpha_2 - d\alpha_d) / Sf'. \quad (7)$$

В уравнении (7) параметры L_1 , L_2 , L_3 , d — линейные размеры элементов, α_1 , α_2 , α_3 , α_4 — значения ТКЛР соответствующих элементов (см. рис. 3), Sf' — задний отрезок объектива.

Подставив в (7) численные величины, взятые из рис. 4, получаем $\alpha_{Sf'} = -14,371 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Рассчитанное $\alpha_{Sf'}$ и полученное $\alpha_{\text{екв}}$ значения имеют различия в третьем знаке после запятой, что приведёт к изменению отрезка Sf' на величину 0,9 мкм, что в 20 раз меньше,

чем, то же изменение для неатермализованной системы. В атермализованной системе изменение фокусного расстояния уменьшено до 0,32%, что приводит к погрешности измерения положения струны порядка 6 мкм, что для практических целей достаточно.

Как говорилось ранее, температурная расфокусировка влечёт за собой ухудшение качества изображения, построенного на фотоприёмнике, что негативно отражается на точности контрольно-измерительной системы. Поэтому, уменьшение параметра $\Delta Sf'$, связанного с изменением заднего отрезка оптической системы, является положительным результатом проведённого исследования.

Спроектированная оптическая система имеет следующие параметры, представленные в табл. 4.

По результатам проделанной работы можно судить о том, что спроектированная конструкция оптической системы является атермализованной, т.к. при изменении температуры задний отрезок существенно не изменяется, и разрешающая способность изменяется не более чем на 5%, что влечёт за собой допустимое изменение качества изображения в плоскости фотоприёмника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы была разработана конструкция оптической системы, включающая в себя объектив конструкции «Триплет-32» и фотоприёмник на ПЗС в еди-

ном корпусе. Данная конструкция была спроектирована для применения в датчиках размерного контроля крупногабаритных объектов, которые эксплуатируются в широком температурном диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. «О безопасности гидротехнических сооружений» [Электронный ресурс]: от 21.07.1997 №117-ФЗ, ред. от 29.07.2018 — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15265/ (26.03.2019)
2. Бурков А.С., Митрофанов С.С. [электронный ресурс]: Возможность создания автоматизированного устройства для контроля плановых смещений тела плотины // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18336> (дата обращения: 26.03.2019).
3. Байбаков А.Н., Ладыгин В.И., Пастушенко А.И. и др. Лазерные триангуляционные датчики положения в промышленных системах контроля и диагностики // Автометрия. 2004. № 2. С. 105–113.
4. Михляев С.В. Анализ оптических триангуляционных систем измерения профиля зеркальной поверхности // Автометрия. 2005. Т. 41. № 4. С. 78.
5. Погорельский С.Л., Шилин А.А. Пассивная атермализация малогабаритных оптических систем в дальнем ИК диапазоне // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 7. С. 196–201.
6. Тягур В.М., Кучеренко О.К., Муравьев А.В. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового ахромата // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 4. С. 42–47.
7. Романова Г.Э., Пысь Г. Исследование аберрационных свойств и возможности пассивной атермализации оптических систем, работающих в области 8–12 мкм систем // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 5. № 2. С. 10–17.
8. Vukobratovich D. Optomechanical design principles. Press LLC, CRC, 1999.
9. Мордасов М.М., Савенков А.П., Сафонова М.Э. и др. Бесконтактное триангуляционное измерение расстояние до зеркальных поверхностей // Автометрия. 2018. Т. 54. № 1. С. 80.
10. Латыев С.М. Конструирование точных оптических приборов. СПб.: Политехника, 2007. 579 с.
11. ГОСТ Р 53340-2009. Приборы геодезические. Общие технические условия. Москва: Изд-во стандартов, 2009.