

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР



АИНФ 520

ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**ЮСТИРОВКА И КОНТРОЛЬ
ЗЕРКАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРИРУЮЩИХ
СИСТЕМ СОЛНЕЧНЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

1980

ШТОРМ В. В., СОКОЛОВ В. Н., СОЛОВЬЕВ А. Н.
Юстировка и контроль зеркальных концентрирующих систем
солнечных энергетических установок: Обзорная информация.
АИНФ 520. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1980. — 32 с.

В обзоре содержатся сведения из литературных и патентных источников о методах и средствах, применявшихся до настоящего времени для юстировки и контроля формы зеркальных поверхностей концентрирующих систем солнечных энергетических установок. Особое внимание уделено зеркальным концентрирующим системам, образованным комбинацией криволинейных и плоских зеркальных элементов. Приведена точностная характеристика примененных методов. Обзор может представить интерес для специалистов, занимающихся гелиотехникой, а также для геодезистов (рис. 13, список лит. — 28 назв.).



Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИАтоминформ), 1980.

АИНФ 520

ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ЮСТИРОВКА И КОНТРОЛЬ ЗЕРКАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРИРУЮЩИХ СИСТЕМ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Контроль и юстировка плоских зеркал	7
1.1. Контроль плоскостности фацет	7
1.2. Юстировка гелиостатов	13
2. Юстировка и контроль зеркала концен- тратора	16
2.1. Контроль сферических фацет	16
2.2. Юстировка и контроль асфери- ческих фацет и блоков фацет	20
2.3. Юстировка и контроль параболического концентратора	23
Заключение	29
Список литературы	31

ВВЕДЕНИЕ

Условимся называть зеркальной концентрирующей системой (ЗКС) совокупность плоских и криволинейных отражающих поверхностей, осуществляющих функцию перераспределения исходной плотности потока лучистой энергии. Подобные системы в настоящее время находят наибольшее применение в гелиотехнике.

В отличие от обычных оптических систем, где отдельные элементы располагаются, как правило, последовательно по ходу луча, ЗКС развита по фронту светового потока. Вследствие этого обстоятельства и чрезвычайно больших размеров системы методика юстировки ЗКС значительно отличается от методики, применяемой для обычных оптических устройств.

ЗКС можно разделить на четыре типа в зависимости от конструкции зеркальных элементов, образующих эти системы:

- 1) криволинейные зеркальные элементы;
- 2) комбинация криволинейных и плоских зеркальных элементов;
- 3) плоские зеркальные элементы;
- 4) зеркальные элементы с переменной кривизной.

К первому типу относятся, например, зеркала имитаторов солнечного излучения и подвижные концентраторы солнечных печей непосредственного слежения [1]; ко второму типу — солнечные печи с гелиостатами [1]; третий и четвертый типы — гелиостатные поля крупных солнечных энергетических станций (рекламное изображение подобной системы приведено в журнале «Америка», 1979, № 273, с. 38). В силу определенных физических ограничений максимальные размеры ЗКС связаны с ее типом: десятки квадратных метров для первого типа, тысячи — для второго и квадратные километры для третьего и четвертого типов.

Естественно, что зеркальные поверхности таких размеров могут быть собраны только из отдельных зеркальных элементов, называемых фацетами, которые в зависимости от размеров ЗКС можно непосредственно крепить на конструкциях системы или же собирать в промежуточные подсистемы — блоки. Для каждого из типов ЗКС необходима индивидуальная методика юстировки, зависящая от конкретной конструкции системы и специфики ее эксплуатации.

В общем виде задачу юстировки ЗКС можно сформулировать как придание всей отражающей поверхности расчетной формы, однако на практике эта задача распадается на несколько подзадач, обусловленных технологией сборки ЗКС. К ним относятся:

- юстировка или контроль поверхности единичного отражающего элемента (фацеты);
- юстировка положения фацет в блоках;
- юстировка положения блоков в ЗКС.

Строго говоря, юстировка поверхности фацет проводится только в том случае, когда форма поверхности может или должна изменяться для получения заданной кривизны. Так обстоит дело, например, при формообразовании фацет методом упругой деформации (солнечные печи в Мон-Луи и Одейо во Франции и др.). В остальных случаях, когда фацетам при их изготовлении тем или иным способом придается неизменная кривизна, при сборке ЗКС остается задача контроля этой кривизны и определения ее соответствия допускам. В обоих случаях можно использовать одинаковую аппаратуру, принцип действия которой зависит не от цели (юстировка или контроль), а от требуемой точности и габаритных размеров фацеты.

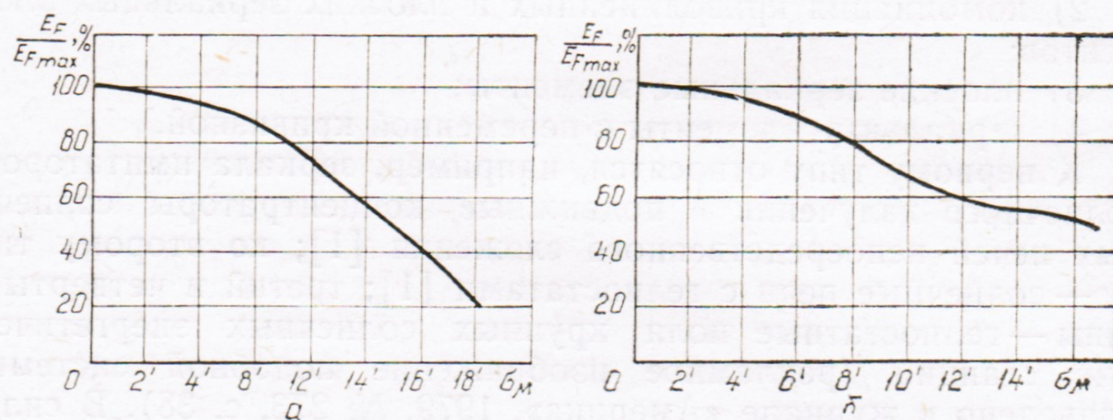


Рис. 1. Зависимость безразмерной фокальной облученности E_F/E_{Fmax} от удвоенных средних квадратических отклонений нормали σ_μ :

a — для параболоида; b — для гелиостата

Не рассматривая причины, которые изложены в специальной гелиотехнической литературе [2], отметим, что в гелиотехнике требования на отклонения нормалей к поверхности зеркала от расчетных положений не превышают $1'$. Из рис. 1 следует, что это требование близко к оптимальному, так как

при сравнительно возможной достижимости указанной точности температура печи близка к максимальной. Повышение точности юстировки до секундных величин не только не целесообразно, но и невозможно, так как из экономических соображений для изготовления фацет используют в лучшем случае флоат-стекло, которое предварительно подвергается огневой полировке и имеет собственное отклонение нормали $1'$.

Габаритные размеры и форма фацет зависят от многих факторов, но постепенно в гелиотехнической практике выработался некоторый оптимальный вариант — квадрат, ромб или шестигранник со стороной 40—50 см. При таком варианте наилучшим образом сочетаются прочностные характеристики стекла и его стоимость с точностью и постоянством формы фацеты. Концентратор хорошо просчитанной солнечной печи мощностью 1 МВт (Одейо) состоит из квадратных фацет размером 45×45 см [3].

Поскольку наилучшими концентрирующими свойствами при большом относительном отверстии обладает параболоид, в концентраторах ЗКС используют преимущественно этот вид поверхности. Чтобы образовать параболоид, фацеты концентратора должны иметь различную кривизну как по собственной поверхности, так и в зависимости от положения в системе. Конечно, изготовление фацет в виде точных участков параболоида экономически невыгодно, поэтому в гелиотехнике широко используются в основном два способа:

1. Поверхность концентратора разбивают на ряд кольцевых зон (5—10), каждая из которых заполняется сферическими фацетами с одинаковым и неизменным радиусом кривизны, задаваемым в процессе изготовления фацет. Таким путем удастся снизить число необходимых типоразмеров фацет до числа зон.

2. Используют плоские в исходном состоянии фацеты, форма поверхности которых задается путем упругой деформации в зависимости от положения, занимаемого ими в системе. Упругодеформированная поверхность может быть с одинаковым успехом приближена как к параболоиду, так и к сфере, хотя никогда не совпадает с ними полностью.

В сложившейся практике юстировки параболоидов точность положения отдельных фацет в блоке оценивается вели-

чиной плотности излучения $E_{\max}$, при этом в расчете предполагается равномерное распределение излучения по окружности диаметром $d = \alpha f$, где α — угол расходимости солнечных лучей ($\alpha = 32'$); f — фокусное расстояние параболоида. В работе [4] приведена формула для расчета плотности излучения

$$E_{\max} = \frac{4\gamma E_{\text{и}}}{\alpha^2} \sin^2 \beta_{\max}, \quad (1)$$

где γ — отражательная способность поверхности зеркала;

$E_{\text{и}}$ — прямое солнечное излучение;

$\beta_{\max}$ — максимальный угол раскрыва параболоида.

Диаметр пятна действительной концентрации солнечного излучения в фокусе вследствие несовершенства поверхности facets и их положения в блоке будет отличаться от расчетной величины d . Так как отраженное излучение с некоторым приближением рассеивается по кругу с центром в фокусе, то диаметр круга рассеивания b обычно используется в качестве меры геометрического несовершенства.

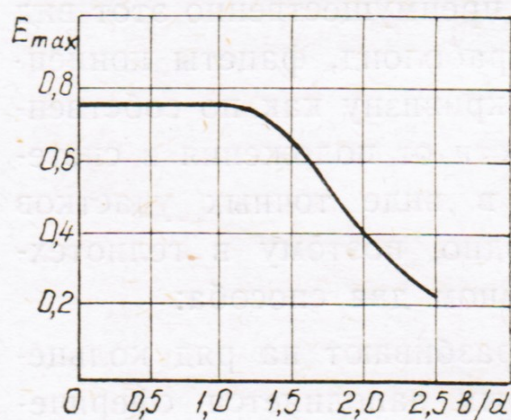


Рис. 2. Влияние геометрического несовершенства, характеризуемого отношением b/d , на максимум плотности излучения в параболоидном зеркале

На рис. 2 показана зависимость величины $E_{\max}$ от отношения b/d . Если диаметр рассеянного отражения b вдвое больше расчетного изображения Солнца d , то максимальная плотность излучения снижается на 60%.

Такие же требования к плотности излучения в фокусе распространяются и на положение блоков в общей системе ЗКС.

Учитывая сложившийся порядок юстировки ЗКС (юстировка facets, юстировка блоков, юстировка системы), материал в обзоре излагается в той же последовательности.

1. КОНТРОЛЬ И ЮСТИРОВКА ПЛОСКИХ ЗЕРКАЛ

1.1. Контроль плоскостности facets

Основными методами исследования плоскостности отражающих плоских поверхностей в настоящее время являются оптические методы, методы с использованием муарового эффекта и интерференционные методы.

Оптические методы наиболее просты и оснащены стандартизированной аппаратурой.

Сущность оптических методов заключается в последовательном освещении участков исследуемой поверхности коллимированным световым лучом, параллельным заранее установленному начальному направлению, и в анализе положения автоколлимационного блика, направляемого исследуемой поверхностью на сетку автоколлиматора. Основная трудность в использовании этого метода состоит в обеспечении параллельности коллимированных световых лучей при перестановке коллиматора, так как площадь контролируемой поверхности ограничивается в одном измерении апертурой автоколлиматора.

Требуемая параллельность может быть обеспечена механически [4], когда два автоколлиматора, отстоящих друг от друга на 10 см, монтировались на специальной станине параллельно и с возможностью перемещения в плоскости, перпендикулярной к их визирным осям. Для контроля параллельности переноса в каждом последующем цикле измерений один из коллиматоров должен быть установлен в точке, где другой коллиматор находился в предыдущем цикле.

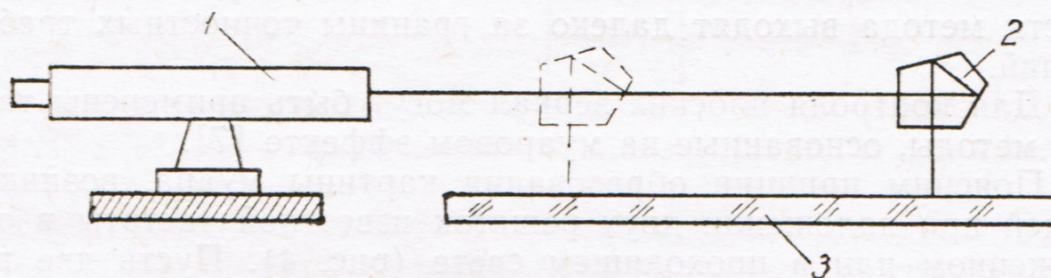


Рис. 3. Схема юстировки плоского зеркала с помощью перемещающейся пентапризмы:

1 — автоколлиматор; 2 — пентапризма; 3 — плоское зеркало

Известны и оптические методы обеспечения параллельности коллимированных лучей, например с помощью перемещающейся пентапризмы при неподвижном автоколлиматоре [5, с. 63]. Пентапризма устанавливается на плоском зеркале так, чтобы отраженные зеркалом нормально падающие лучи направлялись вдоль оси автоколлиматора (рис. 3). Из-

мерения выполняются при перемещении пентапризмы вдоль визирного луча автоколлиматора по поверхности зеркала. Однако при этом можно определить лишь непрямолинейность сечения поверхности, а для определения неплоскостности необходимо проводить измерения не менее чем при двух установках автоколлиматора, связанных между собой.

Оптические методы контроля неплоскостности с использованием автоколлиматоров отличаются высокой точностью, так как искривление поверхности зеркала на угол β вызывает смещение автоколлимационного блика на величину l , определяемую формулой, приведенной в работе [6]:

$$l = 2f_{\text{ак}} \operatorname{tg} \beta. \quad (2)$$

Откуда

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{l}{2f_{\text{ак}}}. \quad (3)$$

Продифференцировав это выражение по переменным β и l и перейдя к средним квадратическим погрешностям, получим

$$m_{\beta} = \frac{\cos^2 \beta}{2f_{\text{ак}}} m_l. \quad (4)$$

Из этого выражения видно, что точность автоколлимационного метода определяется главным образом фокусным расстоянием автоколлиматора и точностью отсчета по сетке. Современные автоколлиматоры с величиной $f_{\text{ак}} \approx 1000$ мм и компенсационной отсчетной системой обеспечивают точность угловых измерений до десятых долей секунды, т. е. возможности метода выходят далеко за границы точностных требований.

Для контроля плоских зеркал могут быть применены также методы, основанные на муаровом эффекте [7].

Поясним принцип образования картины муара, возникающей при наложении двух решеток известной частоты в отраженном или в проходящем свете (рис. 4). Пусть две решетки с параллельными штрихами и частотой m_1 и m_2 наложены одна на другую и повернуты одна относительно другой на угол 2φ , равный $5-10^\circ$. Введем следующие обозначения: a — интервал решетки с частотой m_1 ; b — интервал решетки с частотой m_2 ; g — ширина полосы муара; на рис. 4 это соответствует отрезкам $БВ$, $ЕВ$ и $ДГ$.

Путем несложных тригонометрических преобразований можно вывести соотношение

$$g = \frac{ab}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos^2 \varphi}}. \quad (5)$$

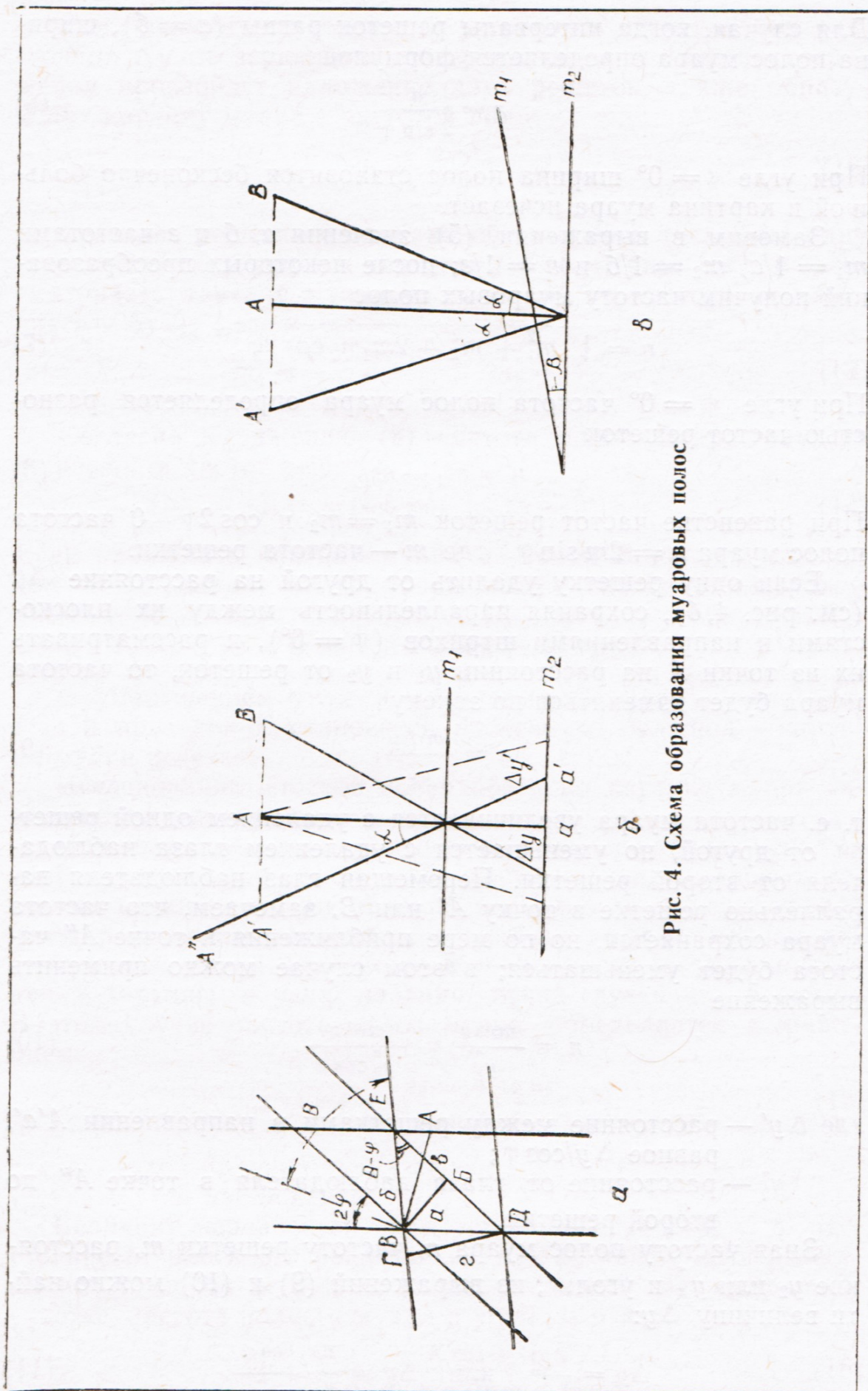


Рис. 4. Схема образования муаровых полос

Для случая, когда интервалы решеток равны ($a = b$), ширина полос муара определяется формулой

$$g = \frac{a}{2 \sin \varphi}. \quad (6)$$

При угле $\varphi = 0^\circ$ ширина полос становится бесконечно большой и картина муара исчезает.

Заменим в выражении (5) значения a , b и g частотами $m_1 = 1/a$, $m_2 = 1/b$ и $n = 1/g$; после некоторых преобразований получим частоту муаровых полос

$$n = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 - 2m_1m_2 \cos 2\varphi}. \quad (7)$$

При угле $\varphi = 0^\circ$ частота полос муара определяется разностью частот решеток

$$n = m_1 - m_2. \quad (8)$$

При равенстве частот решеток $m_1 = m_2$ и $\cos 2\varphi \neq 0$ частота полос муара $n = 2m \sin \varphi$, где m — частота решетки.

Если одну решетку удалить от другой на расстояние Δy (см. рис. 4, б), сохраняя параллельность между их плоскостями и направлениями штрихов ($\varphi = 0^\circ$), и рассматривать их из точки A на расстоянии y_1 и y_2 от решеток, то частота муара будет изменяться по закону

$$n = \frac{m_1 \Delta y}{y_2}, \quad (9)$$

т. е. частота муара увеличивается с удалением одной решетки от другой, но уменьшается с удалением глаза наблюдателя от второй решетки. Перемещая глаз наблюдателя параллельно решетке в точку A' или B , замечаем, что частота муара сохраняется, но по мере приближения к точке A'' частота будет уменьшаться; в этом случае можно применить выражение

$$n = \frac{m_1 \Delta y'}{y_2''} = \frac{m_1 \Delta y}{y_2'' \cos \varphi}, \quad (10)$$

где $\Delta y'$ — расстояние между решетками в направлении $A'a'$, равное $\Delta y / \cos \varphi$;

y_2'' — расстояние от глаза наблюдателя в точке A'' до второй решетки.

Зная частоту полос муара n , частоту решетки m , расстояние y_2 или y_2'' и угол α , из выражений (9) и (10) можно найти величину Δy :

$$\Delta y = \frac{ny_2}{m_1} \quad \text{или} \quad \Delta y = \frac{ny_2'' \cos \alpha}{m_1}. \quad (11)$$

Если решетку с частотой m установить на некотором расстоянии Δy от зеркальной поверхности, то вследствие отражения произойдет наложение двух решеток, также образующих картину муара с частотой полос

$$n = \frac{2m\Delta y}{y}. \quad (12)$$

Если две решетки с одинаковой частотой m наклонить одну по отношению к другой под углом β (см. рис. 4, в) и рассматривать картину муара из точки A' , то частота их изменится и будет равна

$$m_1 = \frac{m}{\cos(\alpha - \beta)}; \quad m_2 = \frac{m}{\cos \alpha}. \quad (13)$$

Согласно выражению (8) частота полос муара зависит от разности частот решеток

$$n = m [\sec \alpha - \sec(\alpha - \beta)]. \quad (14)$$

Если наблюдать картину муара из точки B под тем же углом α , то частоту полос муара можно определить выражением

$$n = m [\sec \alpha - \sec(\alpha + \beta)].$$

С уменьшением угла β ширина полос муара увеличивается и при $\beta = 0^\circ$ становится бесконечно большой — картина муара исчезает.

Исследование плоской поверхности по картине муара заключается в следующем.

При параллельности оптического изображения решетки и испытываемой зеркальной поверхности картина муаровых полос не возникает. При наклоне поверхности к решетке под некоторым углом появляется муаровый эффект, причем частота полос муара изменяется в зависимости от угла наблюдения картины и угла падения пучка лучей на решетку. В этом случае частота полос муара определяется выражением

$$n = m \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2}{\cos \alpha_1 \operatorname{ctg} \beta - \sin \alpha_1} \right), \quad (15)$$

где α_1 — угол падения пучка лучей;

α_2 — угол наблюдения.

Величину неровностей испытываемой поверхности, т. е. расстояние от плоскости решетки Δy , можно найти, если известны число полос муара K , укладывающихся на выбранном участке, частота полос n муара и углы α_1 и α_2 :

$$\Delta y = \frac{K \cos \alpha_1}{n \sin \alpha_1 + m (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2)}. \quad (16)$$

В случае равенства углов освещения и наблюдения, что легко осуществить на практике, формула (16) примет вид

$$\Delta y = \frac{K \cos \alpha_1}{n \sin \alpha_1 + 2m}. \quad (17)$$

Так как величина $n \sin \alpha_1$ мала по сравнению с $2m$, то ее можно опустить и пользоваться выражением

$$\Delta y = \frac{K \cos \alpha}{2m}. \quad (18)$$

Точность определения неровностей методом муара находится по формуле (17) путем ее дифференцирования

$$d\Delta y = \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{n} dK - \frac{K}{n \sin^3 \alpha} d\alpha - \frac{K \operatorname{ctg} \alpha}{n^2} dn. \quad (19)$$

Переходя к средней квадратической ошибке, находим

$$\sigma_{\Delta y} = \pm \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{n} \sqrt{\left(\frac{1}{K}\right)^2 \sigma_K^2 + \left(\frac{2}{\sin 2\alpha}\right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{1}{n}\right)^2 \sigma_n^2}. \quad (20)$$

Интерференционный метод определения неплоскостности отражающей поверхности является наиболее точным, его возможности выходят далеко за рамки требований к неплоскостности фасет современных ЗКС. Так как этот метод применяется при юстировке ЗКС, в обзоре приводятся краткие сведения о нем.

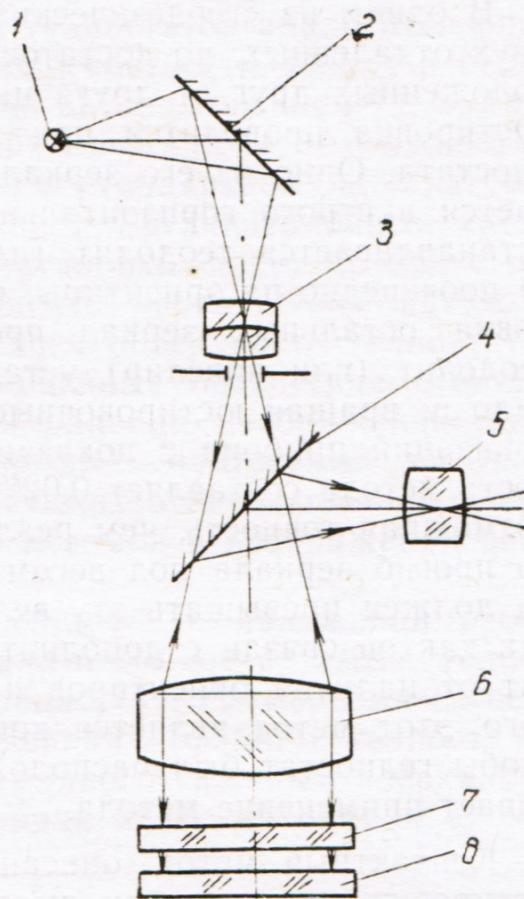
Сущность метода заключается в том, что при наложении двух одинаковых волновых фронтов, проектируемых на экран, на последнем возникают темные и светлые концентрические окружности. Если один из фронтов, обычно образуемый отражением светового потока от контролируемой поверхности, деформирован, то окружности на экране также деформируются. Однако окружности на экране возникают только при строгой параллельности фронтов, чего на практике получить почти невозможно. При небольших углах наклона между фронтами интерференционная картина на экране строится в виде темных и светлых полос. При деформации одного из фронтов полосы в соответствующих участках искривляются.

В настоящее время этот принцип положен в основу ряда приборов, используемых в астрономии для контроля оптических зеркал [8]. На рис. 5 приведена схема устройства с использованием эталонной поверхности, применяемая для контроля неплоскостности по форме интерференционных полос.

Интересен также метод, предложенный в работе [9] для контроля плоских поверхностей. Измерительный пучок, дважды отразившись от испытуемой поверхности, интерферирует

**Рис. 5. Устройство для определения
неплоскостности:**

1 — осветитель; 2 — зеркало ввода;
3 — конденсор с диафрагмой; 4 —
полупрозрачное зеркало; 5 — оку-
ляр; 6 — объектив; 7 — эталонная
поверхность; 8 — исследуемая по-
верхность



с опорным пучком на полупрозрачной плоскости светодели-
тельной призмы. Если поверхность facets плоская, то ин-
терференционные полосы будут прямыми. При наличии от-
клонений полосы приобретают кривизну, величина которой
является функцией неплоскостности. Ошибка измерений опи-
санными устройствами оценивается авторами примерно
 $\pm 1,5$ мкм.

1.2. Юстировка гелиостатов

Задачу юстировки плоских гелиостатов, собираемых из
отдельных facets, можно рассматривать как задачу установ-
ки или контроля положения facets. Как следует из рисун-
ка 1, б, требования к точности поверхности гелиостатов прак-
тически можно было бы ограничить $1'$, но учитывая, что ге-
лиостат собирается из элементов, изготовленных с погреш-
ностью $1'$, то в требованиях к неплоскостности гелиостата
должны учитываться ошибки установки facets.

В практике юстировки гелиостатов в основном использу-
ются три метода, известные в литературе как «геодезиче-
ский», оптический и проекционный [5, 10].

В одном из «геодезических» методов необходимо наличие двух отдаленных, но достаточно отчетливых ориентиров, расположенных друг от друга на расстоянии $\sim 90^\circ$ по азимуту. Юстировка проводится при горизонтальном положении гелиостата. Одно из его зеркал с помощью уровня устанавливается в строго горизонтальное положение. На это зеркало устанавливается теодолит (или нивелир), который наводится поочередно на ориентиры; показания записываются. Юстировка остальных зеркал проводится следующим образом: теодолит (или нивелир) устанавливают на юстируемое зеркало и, вращая юстировочные узлы, добиваются совпадения показаний прибора с показаниями на первом зеркале. Точность метода составляет $0,02''$, но это больше принципиально возможная точность, чем реально достигнутая, так как только прогиб зеркала под весом установленного на нем прибора должен превышать эту величину. Метод не очень удобен, так как он связан с дополнительными вычислениями и зависит от наличия ориентиров и условий их видимости. Кроме того, этот метод является контактным, поэтому необходимо, чтобы гелиостат был расположен горизонтально, что ограничивает применение метода.

Контактный метод описан также в работе [10]. Для юстировки используются высокоточный нивелир и штангенрейсмасс. Гелиостат предварительно устанавливается в горизонтальное положение. На зеркало (над юстировочным узлом) шкалой к нивелиру помещается штангенрейсмасс. Изображение одной из рисок шкалы штангенрейсмасса совмещается с горизонтальным штрихом в поле зрения нивелира. Затем штангенрейсмасс последовательно устанавливается на другие зоны зеркала, расположенные над юстировочными узлами; вращением узлов риска штангенрейсмасса совмещается со штрихом нивелира. Указанная операция проводится на всех зеркалах гелиостата. По данным авторов, ошибка юстировки не превышает $1'$. Юстировка 16-фацетного гелиостата занимает $1,5\text{—}2$ ч, т. е. $6\text{—}8$ мин на одну факету.

Использование специальных приборов для измерения неплоскостности по положению, известных под названием плоскоскопы или плоскомеры [11, 12], позволяет выполнять измерения на гелиостате в произвольном положении последнего со средней квадратической ошибкой $0,05$ мм при расстояниях между прибором и маркой до 10 м, что вполне удовлетворяло бы требованиям к точности установки факет. Однако основным недостатком указанного метода юстировки является необходимость механического контакта измерительного приспособления с исследуемой поверхностью.

Оптический метод юстировки гелиостатов аналогичен описанному в разделе контроля неплоскостности фасет; в основу этого метода положен принцип автоколлимации [4, 5, 13].

Выше упоминалось о высоких точностных возможностях оптического метода и имеющейся стандартной аппаратуре, однако значительные технические и организационные трудности, связанные с контролем установки фасет больших гелиостатов, вызывает необходимость перемещения автоколлиматора или пентапризмы по всей поверхности гелиостата.

Весьма распространены упрощенные оптические методы с визуальной оценкой положения фасет по изображению прямой рейки или совокупности прямых, нанесенных на специальные экраны. При этом на стыках отъюстированных зеркальных фасет не должно быть изломов в изображении рейки или прямых.

Проекционные методы заключаются в наложении изображений источника света, отраженного юстируемым гелиостатом, на сетку удаленного экрана [14]. Размеры ячеек сетки соответствуют размерам зеркал (фасет) гелиостата. Изображения источника, отраженного каждым зеркалом, должны перекрываться на границах ячеек на одну и ту же величину.

При юстировке зеркал по изображению источника света на удаленном экране с сеткой допустимые ошибки можно оценить по перекрытию изображений от двух соседних зеркал. Если число ячеек сетки экрана равно числу зеркал гелиостата, а размеры ячеек равны размерам зеркал, то изображения от всех зеркал наложатся на сеточные ячейки с перекрытием друг друга на величину

$$\delta = 2\varphi R,$$

где φ — угол видимого диаметра Солнца с учетом дополнительного угла, обусловленного отклонением реальной зеркальной поверхности от идеальной;

R — расстояние от соответствующего зеркала гелиостата до экрана.

При **правильной** юстировке взаимное перекрытие двух соседних **изображений** не должно превышать величину δ . Опыт показывает, что граница изображения определяется с точностью до $0,2\varphi$. При расстоянии от гелиостата до экрана ~ 10 м и при $\varphi = 16' + 7' = 23'$ величина перекрытия изображений $\delta = 134$ мм. В этом случае ошибка юстировки $\Delta\varphi = 0,2\varphi$, т. е. $4'36''$.

При наблюдении за наложением изображений через отверстие в экране ошибку юстировки можно уменьшить до $0,1\varphi$, тогда точность юстировки приблизится к требуемой величине.

2. ЮСТИРОВКА И КОНТРОЛЬ ЗЕРКАЛА КОНЦЕНТРАТОРА

Практика создания ЗКС больших размеров определила два основных способа приближения поверхности концентратора к параболоиду: 1) использование жестких сферических зеркал; 2) использование упругодеформируемых facets.

В первом случае кривизну поверхности каждой facets можно проконтролировать на стенде перед сборкой концентратора, во втором случае кривизна задается при сборке facets в блок [1].

Указанные конструктивные различия определили и возможные методы контроля и юстировки facets. Рассмотрим их в отдельности.

2.1. Контроль сферических facets

Для измерения радиусов кривизны сферических поверхностей могут быть использованы известные в оптике приборы и методы.

Наиболее простой и удобный метод контроля радиуса кривизны—с помощью кольцевого сферометра ИЗС-8. В этом случае измерения сводятся к определению стрелы прогиба h контролируемой поверхности и подсчету радиуса кривизны R по формуле, приведенной в работе [8]:

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2}, \quad (21)$$

где r — радиус кольца или опор накладного сферометра.

Однако измерения, проведенные на сферометре, носят локальный характер и не дают представления о статистическом распределении отклонений нормали. Кроме того, механический контакт прибора с поверхностью facets всегда нежелателен.

Из оптических способов измерения радиуса кривизны наиболее удобным является автоколлимационный, основанный на принципе зеркального отражения нормально падающих лучей из центра кривизны поверхности facets. Автоколлимационный метод применяется при измерении радиусов кривизны сферических поверхностей самых различных размеров — от 0,5 мм до нескольких километров [8].

Автоколлимационный метод измерения больших радиусов кривизны (в ЗКС от 5 до 50 м и более) состоит в определении разности $\Delta f'$ между двумя фокусировками зрительной трубы на бесконечно удаленный предмет и на отраженное изображение креста нитей окуляра от поверхности контролируемой facets (рис. 6).

Фокусировка на бесконечность легко осуществляется автоколлимацией от эталонного плоского зеркала, устанавливаемого на место facets. Величина $\Delta f'$ находится из разности отсчетов для двух фокусировок по шкале подвижной окулярной части трубы. Фокусное расстояние объектива зри-

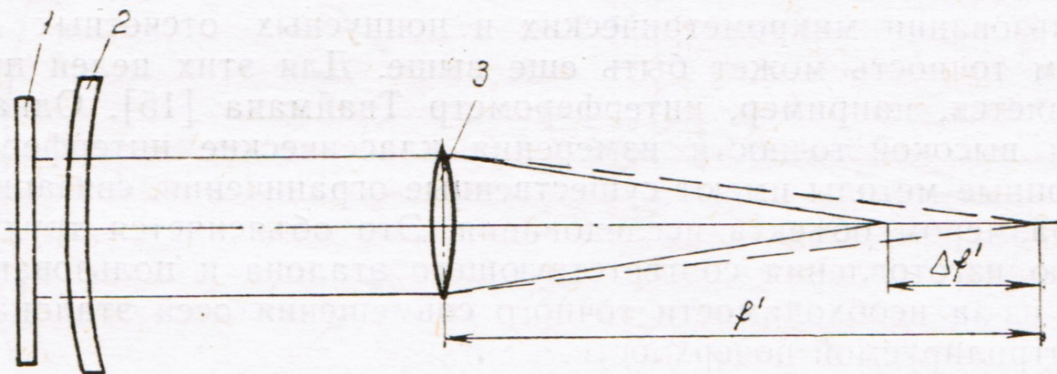


Рис. 6. Контроль радиуса facets методом автоколлимации:

1 — эталонное зеркало; 2 — испытываемая facet; 3 — объектив

тельной трубы f' должно быть известно. Зная, что $R = x + f' - d$ (здесь d — расстояние между передней главной точкой объектива и поверхностью facets) и применяя формулу Ньютона $xx' = (f')^2$, находим выражение, определяющее искомый радиус

$$R = \frac{(f')^2}{\Delta f'} + f' - d. \quad (22)$$

где $\Delta f' = x$.

Точность определения R зависит от ошибки фокусировки на автоколлимационные изображения от ошибки отсчетов по шкале подвижной окулярной части и может быть рассчитана по формуле

$$dR = \frac{(f')^2}{(\Delta f')^2} d\Delta f'. \quad (23)$$

По данным работы [8] относительная ошибка определения радиусов кривизны для величин порядка 10—100 м составляет 0,1—0,5%.

Известны более сложные и точные методы, которые могут быть применены при необходимости. Рассмотрим некоторые из них.

Наибольшую точность измерения дают интерференционные методы, которые позволяют получать волновую картину неточностей поверхности с последующим несложным переходом к геометрическим неточностям.

В интерферометрических методах информация о качестве контролируемой поверхности заключена в интерференционной картине, образуемой наложением эталонной криволинейной волны на другую волну, деформированную контролируемой поверхностью. При прямом наблюдении интерференционных полос точность этих методов составляет $\lambda/2$, при использовании микрометрических и нониусных отсчетных систем точность может быть еще выше. Для этих целей применяется, например, интерферометр Тваймана [15]. Однако при высокой точности измерения классические интерференционные методы имеют существенные ограничения, связанные с размером объекта исследования. Это объясняется трудностью изготовления соответствующего эталона и пользования им из-за необходимости точного совмещения осей эталона и контролируемой поверхности.

С развитием лазерной техники появились методы, позволяющие применять интерферометрию для контроля больших поверхностей. В работе [16] описан метод, позволяющий с помощью CO_2 -лазера быстро и точно измерять профили крупных оптических элементов. При этом методе отклонения профилей от эталонной поверхности, заданной дифракционной решеткой, измеряются с точностью 0,5 мкм.

Модифицированный лазерный неравноплечный интерферометр Тваймана—Грина [17] позволяет проверять качество обработки и радиусы кривизны зеркал сравнительно большого диаметра (до 6 м). В приборе используется HeNe-лазер и объектив микроскопа, обеспечивающий компактность прибора при значительных размерах исследуемых объектов. Преимущество по сравнению с обычным интерферометром заключается в том, что при контроле сферических зеркал любых размеров из центра кривизны отпадает необходимость во вспомогательных плоских зеркалах. Прибор довольно прост и весьма эффективен; схема его показана на рис. 7.

Развитие голографии привело к появлению голографической интерферометрии, основу которой составляют три взаимосвязанных метода: с одно-, дву- и многократной экспозициями [18]. Однократная экспозиция применяется для контроля изменений, которым подвергается объект относительно своего первоначального состояния, двукратная — для изучения явлений, изменяющихся во времени, а многократная — преимущественно при изучении вибраций объектов.

Применение голографии при контроле зеркал описано в работе [19]. С помощью импульсного лазера записывается серия голограмм волнового фронта, отраженного зеркалом. При этом зеркало может быть ориентировано в любом направлении. При стандартных методах проверки вместо зер-

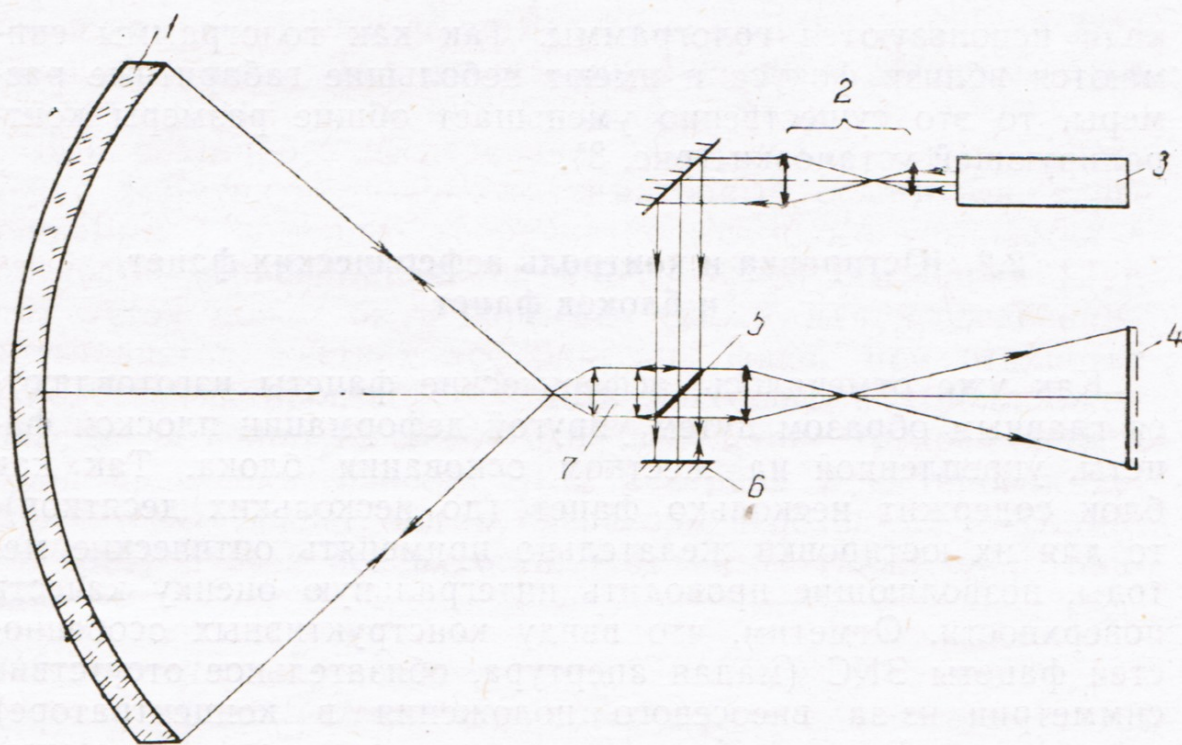


Рис. 7. Лазерный неравноплечный интерферометр:

1 — испытуемое зеркало; 2 — коллиматор; 3 — лазер; 4 — плоскость наблюдения; 5 — светоделительное зеркало; 6 — эталонное зеркало; 7 — объектив микроскопа

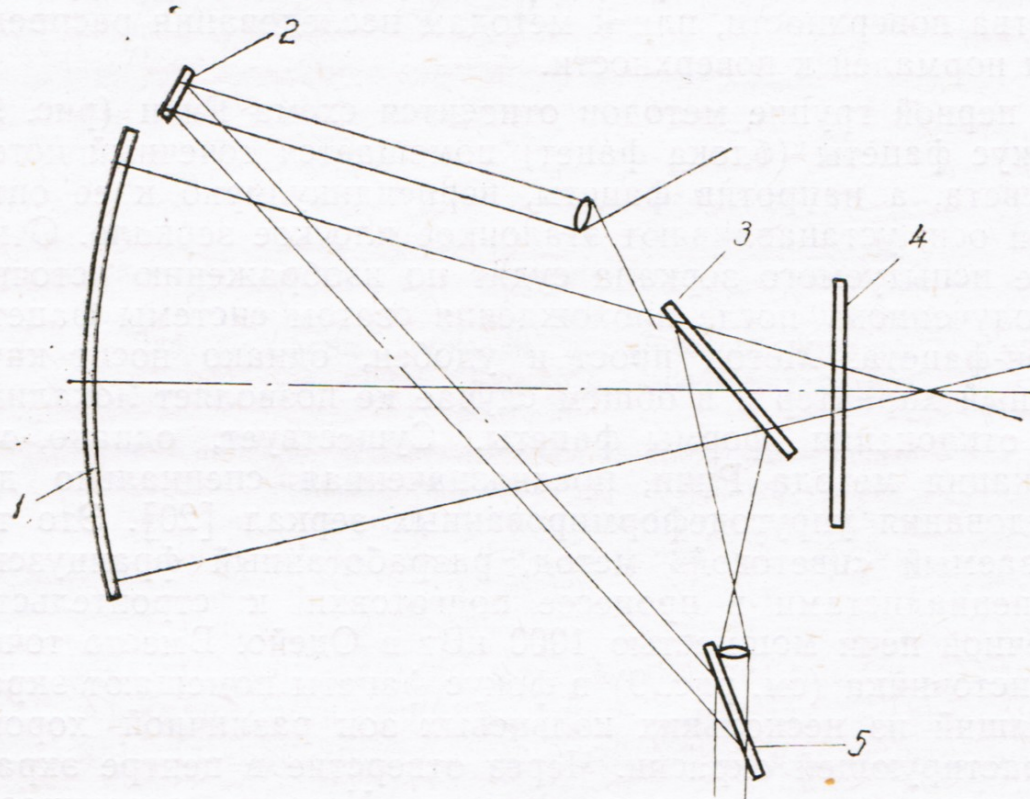


Рис. 8. Схема установки для получения голограммы сферического зеркала:

1 — испытуемое зеркало; 2 — опорный пучок; 3, 5 — светоделительные зеркала; 4 — голограмма

кала используются голограммы. Так как голограммы снимаются вблизи фокуса и имеют небольшие габаритные размеры, то это существенно уменьшает общие размеры контролирующей установки (рис. 8).

2.2. Юстировка и контроль асферических фацет и блоков фацет

Как уже отмечалось, асферические фацеты изготавливаются главным образом путем упругой деформации плоской фацеты, укрепленной на жестком основании блока. Так как блок содержит несколько фацет (до нескольких десятков), то для их юстировки желательно применять оптические методы, позволяющие проводить интегральную оценку качества поверхности. Отметим, что ввиду конструктивных особенностей фацеты ЗКС (малая апертура, обязательное отсутствие симметрии из-за внеосевого положения в концентраторе) практически неприменимы оказываются многие известные и хорошо отработанные в оптике методы, такие, как методы Фуко, Гартмана, интерферометрический и др. В основном методы, применяемые для контроля гелиотехнической фацеты и блока фацет, относятся к группе методов анаберрационных точек, в основу которых положены фокусирующие свойства поверхности, или к методам исследования распределения нормалей к поверхности.

К первой группе методов относится схема Ричи (рис. 9). В фокус фацеты (блока фацет) помещается точечный источник света, а напротив фацеты, перпендикулярно к ее оптической оси, устанавливается эталонное плоское зеркало. О качестве испытуемого зеркала судят по изображению источника, полученному после прохождения светом системы фацета-эталон-фацета. Метод прост и удобен, однако носит качественный характер и в общем случае не позволяет локализовать отклонения формы фацеты. Существует, однако, модификация метода Ричи, предназначенная специально для исследования упругодеформированных зеркал [20]. Это так называемый «цветовой» метод, разработанный французскими специалистами в процессе подготовки к строительству солнечной печи мощностью 1000 кВт в Одейо. Вместо точечного источника (см. рис. 9) в фокус фацеты помещают экран, состоящий из нескольких кольцевых зон различной хорошо контрастирующей окраски. Через отверстие в центре экрана рассматривают поверхность фацеты. Участки поверхности, отличающиеся от параболоида, окрашены, причем цвет сигнализирует о величине отклонений. При идеальной форме фацеты ее поверхность равномерно темная, поскольку на-

блюдатель видит уже не те или иные участки экрана, а собственный зрачок. Для реализации описанных выше методов создаются специальные юстировочные стенды.

Для поэтапного исследования поверхности блока facets можно применять лазерно-коллиматорный осветитель, перемещаемый с помощью координатно-отсчетного устройства в плоскости, перпендикулярной к оптической оси блока [21]. Этот метод может быть применен также для исследования характеристик жестких асферических facets при отработке технологии их производства. Для массового контроля большого числа facets он непригоден вследствие трудоемкости и малой производительности. Для контроля и юстировки деформируемых facets, когда оператору необходима информация сразу о всей поверхности, этот метод также мало пригоден.

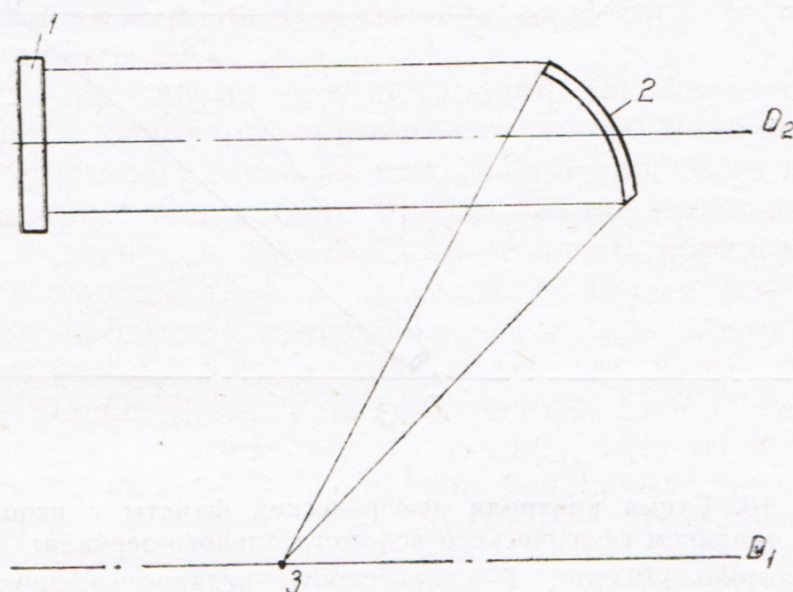


Рис. 9. Схема контроля асферической facets с использованием плоского вспомогательного зеркала:

1 — плоское вспомогательное зеркало; 2 — испытуемое зеркало (facets); 3 — точечный источник света, помещенный в фокусе facets; O_1 и O_2 — оптические оси концентратора и системы контроля

Из всех многочисленных методов исследования распределения нормалей, применяемых для контроля асферических facets, наибольший интерес представляют автоколлимационные методы.

Автоколлимационные методы [22] наиболее просты и дают весьма удовлетворительные результаты. На рис. 10 представлена схема с использованием сферического эталонного

зеркала. Пучок света от объектива коллиматора направляется на исследуемую facету параллельно ее оптической оси. При идеально параболической поверхности facеты плоский фронт световой волны преобразуется в сферический, поступает на эталонное зеркало, отражается от него и после обратного преобразования снова поступает в объектив. Отклонения поверхности facеты от расчетной наблюдаются в окуляре коллиматора. Однако при этом методе необходим коллиматор с большим выходным отверстием, перекрывающим габаритные размеры facеты, что является недостатком метода.

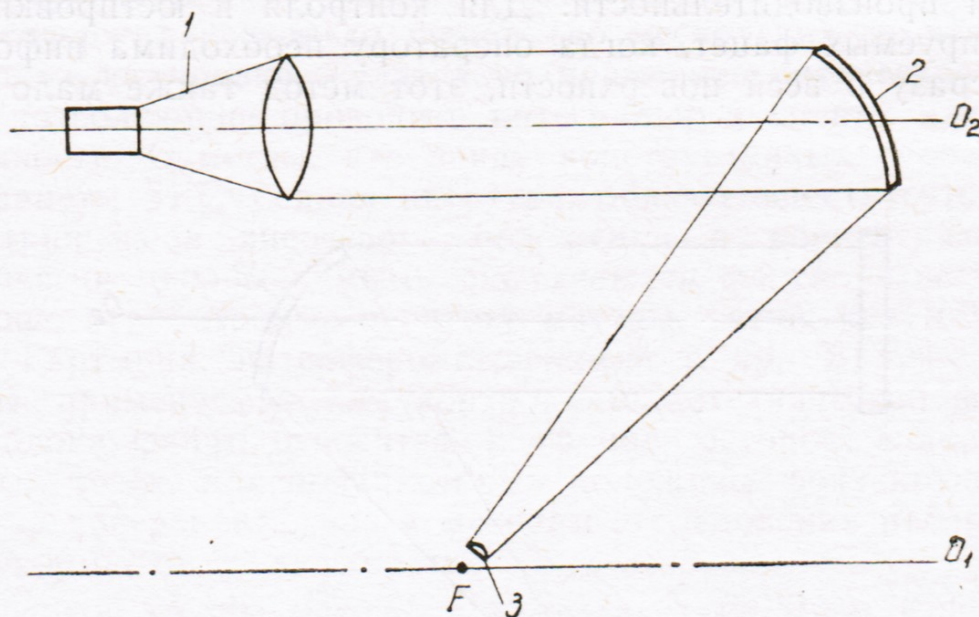


Рис. 10. Схема контроля асферической facеты с использованием сферического вспомогательного зеркала:

1 — автоколлиматор; 2 — испытуемое зеркало (facet);
3 — вспомогательное сферическое зеркало

В машиностроении и светотехнике широко используется метод муаровых полос [13, 23, 24], позволяющий проводить как интегральную, так и локальную оценку распределения нормалей, а также измерения кривизны и прогибов поверхности. Муаровую картину можно наблюдать визуально и фотографировать, что создает определенные удобства при контроле и паспортизации большого числа facet в блоках. Возможности этого метода весьма широкие при сравнительно несложном оборудовании, состоящем из осветителя рассеянного света, растровых решеток и эталонных зеркал.

Точностные характеристики описанной аппаратуры приведены в разделе I настоящего обзора.

2.3. Юстировка и контроль параболического концентратора

Сборка facets в единую систему, представляющую собой зеркало концентратора, ставит перед юстировщиками задачи иного порядка, чем при контроле и юстировке отдельных facets. Сложность этих задач состоит в том, что на площади в тысячи квадратных метров необходимо разместить десятки тысяч facets, причем неточность суммарной поверхности, которую они образуют, должна быть минимальной.

Опыт, накопленный по юстировке существующих ЗКС высокотемпературных солнечных установок, позволил определить основные требования к методам и средствам юстировки:

- высокая точность установки facets или блоков при сборке концентратора (не хуже $1'$);
- высокая производительность юстировочных работ;
- возможность повторных периодических юстировок в процессе работы ЗКС.

В настоящее время для юстировки параболического концентратора в основном применяется метод наложения изображения источника света на фокальную плоскость концентратора. Отличие в реализации метода заключается лишь в конструкции осветителя, что связано главным образом с техническими возможностями и размерами концентратора.

При юстировке сравнительно небольших концентраторов, таких, например, как малая солнечная печь мощностью 62 кВт в Одейо (размер концентратора 10×10 м), в качестве осветителя использовалось Солнце, свет от которого направлялся на юстируемый участок концентратора с помощью заранее отъюстированного управляемого плоского гелиостата [25].

Юстировка заключалась в следующем. Все facets, кроме одной, закрывались шторками из непрозрачного материала. В фокусе концентратора помещался экран, на котором отмечено теоретическое изображение Солнца. Весь концентратор, в том числе и юстируемая faceta, освещался потоком от гелиостата. Открытая faceta фокусировала на экране изображение Солнца, которое оператор совмещал с теоретическим изображением с помощью юстировочных винтов facets. После этого отъюстированная faceta закрывалась шторкой, открывалась следующая faceta и процесс повторялся.

Эта же методика применялась при юстировке концентратора солнечной печи «Гелиодина» (Бузарех, Алжир) [26], имеющего также сравнительно небольшое число facets — 181.

При юстировке концентратора солнечной печи в Сёндай (Япония), диаметр которого 10 м, участки концентратора ос-

вещались коллимированными источниками света, расположенными на специальных направляющих, перпендикулярных к оптической оси концентратора [4]. Пучок света от коллиматора подавался на юстируемую facету параллельно оптической оси. Юстировка заключалась в совмещении отраженного от facеты пучка с расчетным фокусом концентратора.

Этот метод обеспечивает удовлетворительную точность ($\sim 1,2'$), но с увеличением размеров концентратора резко возрастает стоимость сооружения направляющих, способных перекрыть его мидель. Тот же метод наложения был использован при юстировке концентратора диаметром 12 м в Мон-Луи [27]. Концентратор был разделен на блоки facет, которые предварительно юстировались на специальном стенде. Окончательная юстировка концентратора заключалась в совмещении изображений Солнца, создаваемых блоками в фокусе при одновременном освещении всей поверхности с помощью гелиостата.

В литературе не удалось найти описания метода юстировки концентратора большой солнечной печи в Одейо (средний диаметр 50 м, 9500 facет), но, судя по отчетам специалистов-гелиотехников, посещавших эту солнечную печь, юстировка проводилась в два этапа, причем первый (предварительный) был осуществлен строительной фирмой, сооружавшей объект, с использованием обычных геодезических методов и приборов. Второй этап (точная юстировка) проводился персоналом, обслуживающим солнечную печь, по следующей методике.

Предварительно все facеты были установлены в заранее разъюстированное положение. Одним из гелиостатов освещали участок поверхности концентратора. Оператор выставлял одну из facет этого участка в положение, при котором отраженный ею пучок попадал на экран, установленный в фокусе, и с помощью фотодатчика совмещал энергетический центр пятна с центром экрана. После этого facета снова отводилась в нерабочее положение, но на определенное число оборотов юстировочных винтов, которое записывалось в журнале. Такая операция повторялась для всех facет данного участка, после чего включался другой гелиостат (предварительно все гелиостаты были тщательно отъюстированы на плоскость). По окончании этих работ переходили ко второму циклу — каждая facета устанавливалась в расчетное положение согласно записям. Предполагалось, что за время первого цикла существенных осадок и деформаций каркаса не происходило, так как эти деформации уже не могли быть откорректированы. В целом юстировочные работы по ЗКС этой печи заняли два года.

Отметим, что описанный способ практически исключает возможность профилактической юстировки.

Приведенные выше методы юстировки концентратора ЗКС прошли апробацию на конкретных установках. В литературе описаны также и другие методы и устройства, которые могут представлять интерес.

Так, например, метод Ричи [20] может быть применен не только для контроля отдельного блока facets, но и для юстировки концентратора в целом. В этом случае роль вспомогательного плоского зеркала играют гелиостаты, установленные параллельно плоскости мишени концентратора (рис. 11).

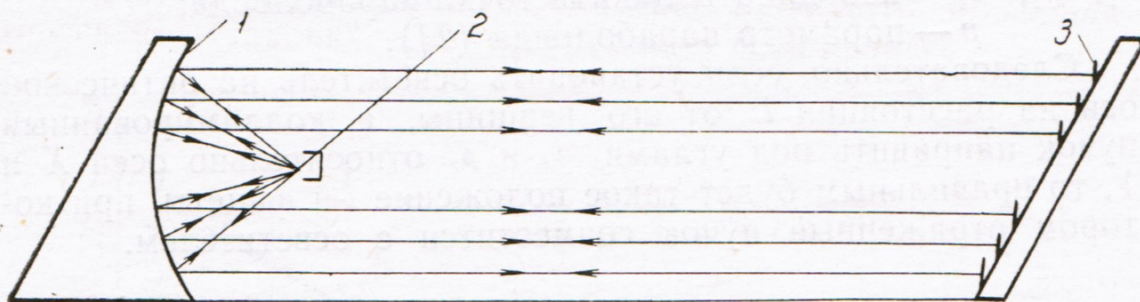


Рис. 11. Применение схемы Ричи для юстировки концентратора:
1 — параболический концентратор; 2 — фокус параболоида; 3 — гелиостаты

С помощью точечного источника света (или светящегося экрана) освещается сразу вся поверхность зеркала концентратора, наблюдаемая оператором из точки фокуса. Отклонения формы проявляются в виде неравномерности освещенности или цветowych пятен. Достоинства метода состоят в том, что оператор видит одновременно всю поверхность концентратора без каких-либо сканирующих устройств и может управлять не одной, а несколькими юстировочными установками. Несмотря на то, что в схеме участвуют гелиостаты, суммарная погрешность все-таки меньше, поскольку гелиостаты неподвижны и отсутствуют составляющие погрешности, связанные с работой системы слежения. Собственные неточности поверхности гелиостатов в этом случае приобретают систематический характер и даже могут быть отчасти скорректированы юстировкой концентратора.

При юстировке концентратора можно исследовать также фактическое распределение нормалей к поверхности зеркала и приводить их в расчетное положение (рис. 12) [28].

Зависимость между координатами точки, к которой восстановлена нормаль, и координатами самой нормали для параболоида имеет вид

$$\alpha_i = \arctg \sqrt{\frac{y_i^2 + z_i^2}{p}}; \quad \beta_i = \arctg \frac{y_i}{z_i}; \quad l_i = p + x_i, \quad (24)$$

где α_i — угол между нормалью к данной точке параболоида и его главной осью X ;

β_i — угол между проекцией нормали на плоскость миделя YZ и осью Y ;

l_i — расстояние от вершины параболоида до точки пересечения нормали с главной осью;

x_i, y_i, z_i — координаты данной точки параболоида;

p — параметр параболоида ($2f$).

Следовательно, если установить осветитель на оптической оси на расстоянии l_i от его вершины, а коллимированный пучок направить под углами α_i и β_i относительно осей X и Y , то правильным будет такое положение i -й facets, при котором отраженный пучок совместится с осветителем.



Рис. 12. Схема юстировки концентратора по методу нормалей:

1 — концентратор; 2 — гелиостаты; 3 — направляющая для юстировочной аппаратуры; 4 — опора направляющей; 5 — фокальная камера

Для перехода к следующей facete необходимо перевести осветитель в другое положение, вычисленное по ее координатам и уравнениям (24). Отсюда видно, что при сканировании поверхности концентратора по методу нормалей необходимо, чтобы осветитель имел всего одно линейное перемещение (вдоль оси X), причем на сравнительно небольшую величину, так как максимальные координаты параболоида по осям y и z в четыре-пять раз больше максимальной ординаты x . Это обстоятельство, а также то, что с помощью этого метода можно проконтролировать не только параболоид, но

и любую поверхность (эллипсоид, сферу, корригированный и ступенчатый параболоиды, френелевские зеркала и др.) являются бесспорными достоинствами схемы. Удобно и то, что юстировка по этому методу может проводиться даже при работающей печи, поскольку осветитель и приемник находятся далеко за пределами фокальной камеры, а гелиостаты в схеме не участвуют.

Недостатком схемы следует признать то, что для ее работы необходимо предварительно с достаточной точностью определить координаты facets x_i , y_i , z_i и проделать большой объем вычислений.

Интересна также модификация способа, примененного при юстировке концентратора в Одейо. Она позволяет отказаться от использования гелиостатов, проводить профилактическую юстировку, а также упрощает весь процесс.

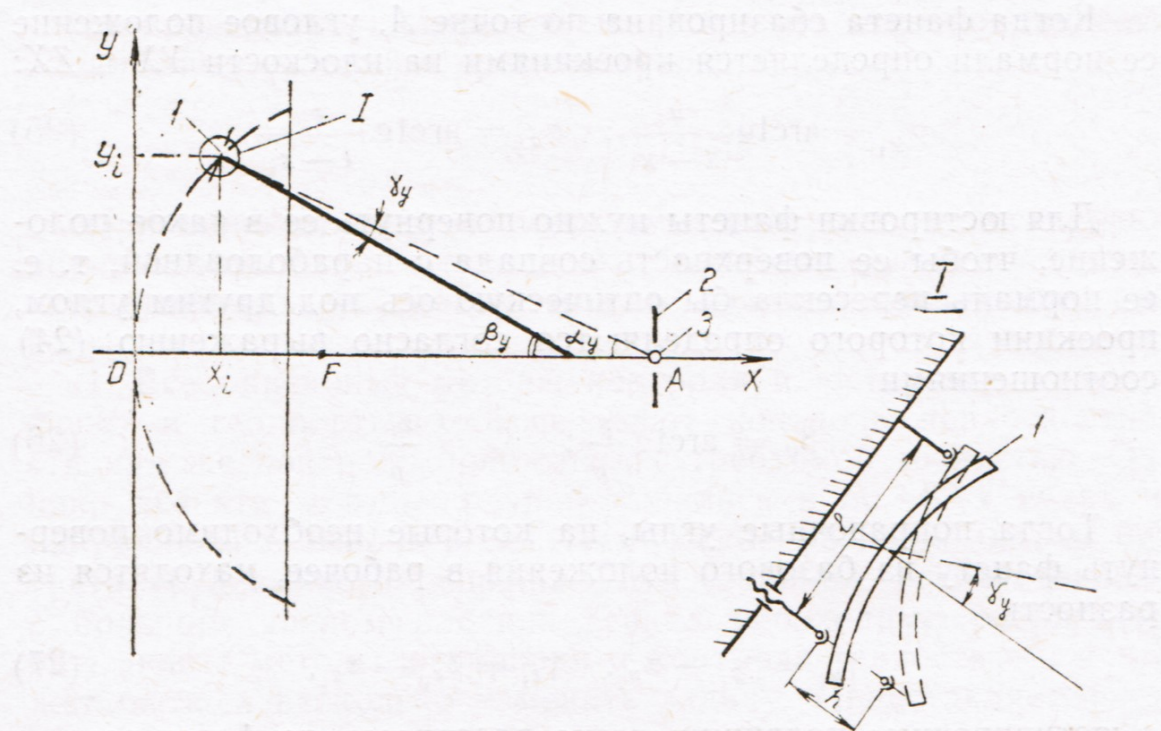


Рис. 13. Схема юстировки концентратора по методу базирования facets:

1 — юстируемая facets; 2 — экран; 3 — базовая точка

В некоторой точке A в зафокальной области (рис. 13) (например, на оптической оси на расстоянии $p + x$, где p — параметр поверхности; x — ее максимальная глубина) размещают источник света и совмещенный с ним измерительный экран. Для базирования facets ее поворачивают до положения, при котором центр отраженного пучка совпадает с центром экрана. После того как facets сбазирована, по ее координатам, координатам базовой точки и уравнению по-

верхности вычисляют поправочные углы γ и величину поступательного перемещения h юстировочных узлов. Вычисления проводят следующим образом.

Введем обозначения:

p — параметр поверхности;
 l — расстояние от вершины до базовой точки;
 d — расстояние между юстировочными узлами одной facets;

$a = l - p$; $b = \frac{d}{p}$ — вспомогательные величины;

x_i, y_i, z_i — координаты юстируемой facets;

γ_y, γ_z — вычисляемые поправочные узлы;

h_y, h_z — вычисляемые подвижки юстировочных узлов.

Когда facets сбазирована по точке A , угловое положение ее нормали определяется проекциями на плоскости YX и ZX :

$$\alpha_{y_i} = \arctg \frac{y_i}{l - x_i}; \quad \alpha_{z_i} = \arctg \frac{z_i}{l - x_i}. \quad (25)$$

Для юстировки facets нужно повернуть ее в такое положение, чтобы ее поверхность совпала с параболоидной, т. е. ее нормаль пересекла бы оптическую ось под другим углом, проекции которого определяются согласно выражению (24) соотношениями

$$\beta_{y_i} = \arctg \frac{y_i}{p}; \quad \beta_{z_i} = \frac{z_i}{p}. \quad (26)$$

Тогда поправочные углы, на которые необходимо повернуть facets из базового положения в рабочее, находятся из разности

$$\gamma_{y_i} = \beta_{y_i} - \alpha_{y_i}; \quad \gamma_{z_i} = \beta_{z_i} - \alpha_{z_i}, \quad (27)$$

а юстировочные подвижки легко рассчитать по формулам

$$h_{y_i} = d \operatorname{tg} \gamma_{y_i}; \quad h_{z_i} = d \operatorname{tg} \gamma_{z_i}. \quad (28)$$

Из формул (25) — (28) путем простых тригонометрических преобразований выводятся уравнения для прямого расчета юстировочных подвижек

$$h_{y_i} = y_i c; \quad h_{z_i} = z_i c, \quad (29)$$

где $c = b \frac{(a - x_i)}{(l + x_i)}$ — вспомогательная величина, постоянная для

данной facets;

a, b — вспомогательные величины, постоянные для концентратора.

Три последние описанные схемы нуждаются в экспериментальной проверке, после которой можно решить вопрос о целесообразности их применения. Однако учитывая имеющиеся сведения о методах юстировки параболоидов, габаритные размеры и требования к гелиоустановкам промышленного назначения [1], можно сформулировать следующие общие технические требования к схеме юстировки параболоида:

- 1) точность юстировки концентратора любого размера и различной конструкции должна быть не хуже $1'$;
- 2) с целью сокращения сроков ввода печи юстировка в период монтажа должна проводиться параллельно несколькими бригадами на разных участках параболоида;
- 3) профилактическую юстировку необходимо проводить без останова печи;
- 4) проведение юстировочных работ не должно зависеть от погодных условий и времени суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При ознакомлении с методами контроля и юстировки крупногабаритных зеркальных концентрирующих систем энергетических установок можно сделать следующие выводы:

1. Все описанные методы контроля и юстировки плоских фазет и гелиостатов обеспечивают контроль неплоскостности или же контроль положения с требуемой точностью. Однако все эти методы разрабатывались в 50—60-х годах и направлены в основном на техническое решение задачи без учета трудоемкости решения. Для создания гелиоустановок с большим числом плоских зеркал необходимо разрабатывать новые методы юстировки и контроля гелиостатов, а может быть и несколько изменить задачу. Представляется целесообразным разделить задачу на две:

Первая задача — юстировка гелиостатов, причем процесс юстировки должен быть механизирован, для чего можно использовать как механические, так и оптические шаблоны или же устройства, задающие опорную плоскость параллельно плоскости гелиостата, дающие информацию о взаимном положении каждой фазеты гелиостата. Эта задача может быть решена на специальном стенде.

Вторая задача — экспресс-контроль работоспособности отъюстированного гелиостата, установленного на его штатном месте. Для решения второй задачи необходимо создание автоматизированного устройства, основанного, например, на использовании муарового эффекта, дающего информацию о гелиостате в целом.

2. Вопрос контроля и юстировки ЗКС, несмотря на его значимость для создания и эксплуатации гелиотехнических установок, до сих пор не имеет специальных решений и не выделился в самостоятельное научно-техническое направление, так как для контроля и юстировки ЗКС используются главным образом или оптические методы, разработанные для юстировки небольших оптических систем, адаптация которых для систем в открытой атмосфере с апертурой в несколько десятков метров, часто с неоптической поверхностью, приводит к излишнему запасу точности и крайне низкой производительности работ, или проекционные — наложение изображения источника света на фокальную плоскость. Последние на первый взгляд кажутся наиболее пригодными для ЗКС, однако имеют важный недостаток — использование фокуса для контроля и юстировки ЗКС, что приводит к длительной остановке системы. Кроме того, проекционные методы дают только качественную, а не количественную характеристику положения каждой facets в ЗКС, что сводит процесс юстировки к последовательным приближениям, трудно поддающимся автоматизации.

3. Методы, известные в литературе по юстировке ЗКС как «геодезические», хотя и оснащены некоторым геодезическим оборудованием (теодолитами и нивелирами), отличаются явно не профессиональными решениями (например, установка теодолита непосредственно на зеркальную поверхность facets), что делает их почти неприменимыми.

4. На основании таких особенностей ЗКС, как использование неоптических отражающих поверхностей, наличие значительных рефракционных полей, значительная длина оптических лучей в ЗКС (до нескольких сот метров) можно сделать вывод, что задачу юстировки ЗКС целесообразно решать не оптическими методами (формирование изображения), а методами прикладной геодезии, т. е. путем точного определения пространственных координат контрольных точек, выбранных на юстируемых поверхностях.

В настоящее время процесс определения координат может быть полностью автоматизирован, например путем измерений дальности светодальномером или интерферометром, точность которых с учетом, что предварительные измерения при монтаже дадут разрешение неоднозначности, может быть не грубее 0,5 мм, что позволит определять правильность ориентации блоков facets размером 200×200 см с погрешностью не более 1,5'.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Исследования** по использованию солнечной энергии. Под ред. В. А. Баума: М., Изд-во иностр. лит., 1957, с. 175.
2. **Захидов Р. А., Умаров Г. Я., Вайнер А. А.** Теория и расчет гелиотехнических концентрирующих систем. Ташкент, Фан, 1977.
3. **Солнечная** печь мощностью 1000 кВт Национального центра научных исследований Франции в Одейо (конструкция, параметры и первые результаты работ). — Гелиотехника, 1974, № 4, с. 29—32.
4. **Хисао Мии.** Высокотемпературные исследования в Японии. — В кн.: Исследования при высоких температурах. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
5. **Апариси Р. Р., Колос Я. Г.** Юстировка оптических систем высокотемпературных солнечных установок. — В кн.: Тепловые установки для использования солнечной радиации. М., Наука, 1966.
6. **Афанасьев В. А., Усов В. С.** Оптические приборы и методы контроля прямолинейности в инженерной геодезии. М., Недра, 1973.
7. **Афанасьев В. А.** Оптические измерения. М., Недра, 1968.
8. **Бубие И. Я., Робачевская В. И., Савин В. А.** — Новая техника в астрономии, 1967, вып. 3, с. 219.
9. **Sounders J., Ceress F.** Interferometer for large surfaces. — U. S. National Bureau of Standards. — J. of Research, 1959, ser. A, v. 62, N 4, p. 137.
10. **Башняк А. Я., Мазашев Ю. З., Нечаева Л. В., Рудштейн В. Л.** К вопросу юстировки плоских ориентаторов для солнечных печей. — Гелиотехника, 1975, № 3—4, с. 23.
11. **Шторм В. В., Велижанин В. А.** Оптический плоскоскоп. — Б. И., 1976, № 42, а. с. 535454.
12. **Оптический** плоскомер ИС-41М. Техническое описание. Новосибирский приборостроительный завод им. В. И. Ленина, 1974.
13. **Шнейдерович Р. М., Левин О. А.** Измерение полей пластических деформаций методом муара. М., Машиностроение, 1972.
14. **Fourakis E., Severson A.** Low-profile heliostat design for solar central receiver systems. — Solar Energy, 1977, v. 19, p. 349—356.
15. **Twyman F.** An interferometer for testing camera lenses. — Trans. Opt. Society, 1909, v. 22, p. 1920—1921.
16. **Олендер Л. А., Нехамкин Э. Л.** Современные средства и методы контроля криволинейных поверхностей. Минск, БНИИТИ, 1975.
17. **Lamare M., Simon J.** Interferomètre laser de controle des systemes optiques. — Nouvelle Revue d'Optique Applique, 1971, v. 2, N 6, p. 317—320.
18. **Применение** лазеров. М., Мир, 1974.
19. **Hildebrand B., Heiness W., Larkin R.** Holography as a tool in the testing of large aperture optics. — Appl. Optics, 1967, v. 6, N 7, p. 1267—1269.
20. **Perrot M., Peytavin A.** A method of shaping mirror elements by elastic deformation. — Solar Energy, 1966, v. 10, N 1, p. 58—61.
21. **Захидов Р. А., Соколов В. Н., Панов П. А.** Применение лазеров для контроля гелиотехнических отражателей. — Гелиотехника, 1977, № 1, с. 38.
22. **Пуряев Д. Т.** Методы контроля оптических асферических поверхностей. М., Машиностроение, 1976.
23. **Дюрелла А., Паркс В.** Анализ деформаций с использованием муара. М., Мир, 1974.

24. Сухарев И. П., Ушаков Б. Н. Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос. М., Машиностроение, 1969.
25. James M. Les fours solaires du Laboratoire Central de l'Armement.— Rev. int. Heliotechn. Temp. et. Refract, 1975, v. 12, p. 301—306.
26. Гийемен Дж. «Гелиодина» — солнечная печь в Алжирской обсерватории. — В кн.: Солнечные высокотемпературные печи. М., Изд-во иностр. лит., 1960, с. 135—166.
27. Пат. № 2707903 (США).
28. Соколов В. Н., Захидов Р. А., Пирматов И. И. и др. Способ юстировки фасетных концентраторов. — Б. И., № 2, 1979, а. с. 672451.

Валерий Васильевич Штурм, Владимир Николаевич Соколов,
Алексей Николаевич Соловьев

**ЮСТИРОВКА И КОНТРОЛЬ
ЗЕРКАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРИРУЮЩИХ СИСТЕМ
СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Обзорная информация

Ответственный за выпуск И. Д. Журкина

Редактор Н. П. Котик

Технический редактор Г. С. Комина

Подписано в печать 29.04.80

Т-07757

Формат 60 × 90^{1/16}

Высокая печать

Усл. печ. л. 2,0 Уч.-изд. л. 1,8

Тираж 360 экз.

Заказ 612

Индекс 4629

119146, Москва, Г-146, аб/ящ 584

Цена 18 коп.

Индекс 4629

**Юстировка и контроль зеркальных концентрирующих систем
солнечных энергетических установок. АИНФ 520, 1980, с. 1 — 32.**