

14. Агучин В. В., Зилинг К. К., Покровский Л. Д. Диффузия титана в LiNbO_3 и LiTaO_3 из поверхностного источника // Поверхность. Физика, химия, механика.— 1987.— № 8.
15. Шевченко В. В. Методы формул сдвига в теории диэлектрических волноводов и волоконных световодов // Радиотехника и электроника.— 1986.— 31, № 5.
16. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин.— Л.: Наука, 1974.
17. Худсон Д. Статистика для физиков: Пер. с англ.— М.: Мир, 1970.

Поступила в редакцию 19 декабря 1988 г.

УДК 535.317.2 : 681.786.23

Е. Н. БОГОМОЛОВ, В. Н. ВЯЗАНИЦИ, Н. И. ЕВСЕЕНКО, Ю. П. КОРОНИИ,
Б. Е. КРИВЕНКОВ, Е. Б. КУКАРКИНА, В. А. ПРОШИНА, И. В. ЯРОСЛАВЦЕВ
(Новосибирск)

УСТАНОВКА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КВАРЦЕВЫХ ТРУБ

Введение. Исходным материалом для изготовления волоконно-оптических световодов являются опорные трубы длиной 1250 мм из прозрачного кварцевого стекла. Неравномерность диаметра и толщины стенки трубы вызывает при изготовлении световода нарушение формы профиля показателя преломления и как следствие рост дисперсии и затухания при распространении света в волокне, поэтому на геометрические размеры опорных труб накладываются жесткие ограничения.

Допуски для опорной трубы первой категории в зависимости от номинальных значений диаметра (от 17 до 25 мм) и толщины стенки (от 1,2 до 2,8 мм) составляют: на наружный диаметр $\pm(150-300)$ мкм; на толщину стенки $\pm(30-50)$ мкм; на отклонение от прямолинейности оси трубы 1,25 мм. Следовательно, погрешность контрольно-измерительного оборудования должна быть не более ± 10 мкм при измерении толщины стенки и порядка ± 20 мкм при измерении диаметра трубы, причем наблюдается тенденция увеличения диаметра до 40 мм.

За рубежом для контроля геометрических размеров опорных труб используются автоматизированные измерительные системы фирм «ОРТЕС» (ФРГ) и «Special Gas Controls» с оптическими датчиками GG1005 фирмы «ВЕТА» (Англия). Однако низкая производительность (5—15 мин на измерение одной трубы) и высокая стоимость установок препятствуют их внедрению в отечественную промышленность.

В настоящей статье описана высокопроизводительная установка контроля геометрических размеров опорных труб «Родник», созданная с использованием разработанных в СО АН СССР оригинального фотоприемного модуля и модуля цифровой обработки видеосигнала, сопрягаемого с шиной микроЭВМ типа «Электроника 60».

Структурная схема (рис. 1). Установка содержит два оптических канала 2 и 3, обеспечивающих независимое измерение диаметра и толщины стенки трубы. Для измерения толщины стенки использован метод отражения от передней и задней поверхностей [1], основанный на освещении трубы наклонно падающим пучком света и измерении расстояния между лучами, отраженными от наружной и внутренней поверхностей прозрачной стенки. В канале наружного диаметра использован метод формирования оптического изображения [2] с инфракрасным источником, равномерно освещающим зону измерения параллельным пучком излучения, хорошо зарекомендовавший себя в фотодиодном измерителе размеров «Сенсор» [3].

© 1990 Богомолов Е. Н., Вязаници В. Н., Евсеевко П. И., Коронии Ю. П., Кривенков Б. Е., Кукаркина Е. Б., Прошина В. А., Ярославцев И. В.

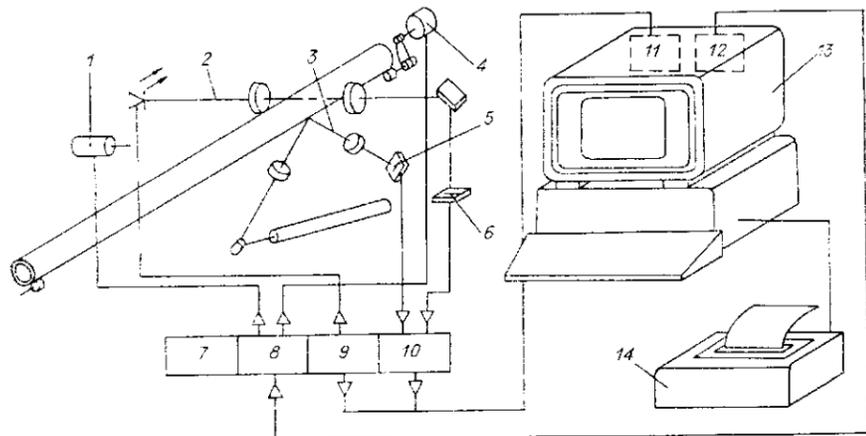


Рис. 1. Структурная схема установки:

1 — привод перемещения измерительного блока; 2 — канал измерения наружного диаметра; 3 — канал измерения толщины стенки; 4 — привод вращения трубы; 5, 6 — фотоприемные устройства; 7 — блок питания; 8 — источник питания двигателей; 9 — источник питания осветителей; 10 — блок управления; 11 — модуль АЦП; 12 — интерфейс приводов; 13 — микроЭВМ; 14 — печатающее устройство

Регистрация оптических сигналов осуществляется двумя одинаковыми фотоприемными устройствами 5, 6 на основе фотодиодной линейки ЛФ1024-25. Режим работы фотоприемных устройств задается блоком управления 10, им же осуществляются предварительная обработка, мультиплексирование и передача видеосигналов в модуль АЦП 11. Оригинальный программно управляемый модуль АЦП оцифровывает видеосигналы, осуществляет их коррекцию с учетом разброса чувствительности элементов фотодиодных линеек и передачу в шину микроЭВМ. Модуль содержит 8-разрядный АЦП, буферное ОЗУ, ОЗУ корректирующих коэффициентов и 8-разрядный аппаратный умножитель.

Математическая обработка отсчетов видеосигнала, расчет геометрических параметров трубы и управление работой установки выполняются микроЭВМ 13 по рабочей программе, записанной на ГМД. Управление приводами 1 (перемещение и остановка измерительного блока) и 4 (вращение трубы) осуществляется через расположенный в корзине ДВК интерфейс приводов 12 и источник питания двигателей 8.

Конструктивно установка состоит из станины с горизонтальной направляющей длиной 2 м, на которой расположены два кронштейна для крепления трубы и измерительный блок; электронного блока, смонтированного в станину, и микроЭВМ ДВК-3М. В рабочем режиме измерительный блок перемещается вдоль трубы с шагом 100 мм, а труба поворачивается в кронштейнах с шагом 30°. В каждом сечении контролируется двенадцать точек. Результаты измерения геометрических размеров в каждой точке трубы выводятся на экран видеомонитора. Распечатка итоговых данных представляет собой технический паспорт конкретного экземпляра трубы.

Схема измерения толщины стенки (рис. 2, а). Для измерения толщины стенки использована оригинальная оптическая схема, обеспечивающая неизменное расстояние между отраженными лучами при воздействии таких возмущающих факторов, как наличие свилей в стекле, клиновидность стенок, смещения и наклоны оси трубы. Осветительная часть, состоящая из He—Ne-лазера ЛГН-207 мощностью 1 мВт (на рисунке не показан) и трех цилиндрических линз 1-3, формирует на поверхности трубы 4 узкую линию размером 0,15 × 10 мм, перпендикулярную оси трубы. Ось осветительной системы образует с нормалью к поверхности трубы угол $\alpha = 49,5^\circ$. Линзы 5, 7 приемного объектива представляют собой телецентрическую оптическую систему, переносящую

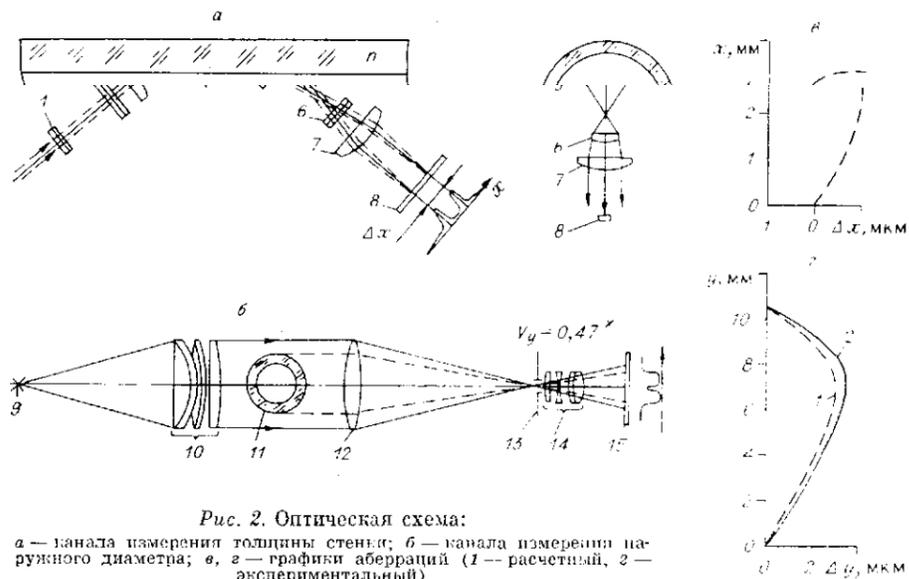


Рис. 2. Оптическая схема:
 а — канала измерения толщины стенки; б — канала измерения наружного диаметра; в, г — графики aberrаций (1 — расчетный, 2 — экспериментальный)

отраженные лучи с поверхности трубы в плоскость фотоприемного устройства 8 с увеличением $V = 1^{\times}$. Для уменьшения полевых aberrаций объектив выполнен из двух одинаковых линз по схеме, обеспечивающей симметричный ход лучей. При этом полевые aberrации первой линзы 5 компенсируются равными по величине и обратными по знаку aberrациями второй линзы 7 и расчетное значение дисторсии на поле 12 мм не превышает ± 1 мкм (рис. 2, в). В плоскости, параллельной оси трубы, линзы 5—7 образуют цилиндрический коллиматор, в фокусе которого расположена узкая щель фотоприемного устройства 8. Благодаря этому при смещениях трубы на фотоприемное устройство попадают только лучи, отраженные от ее вершины (точка А), распространяющиеся параллельно оптической оси коллиматора. Изображение регистрируется линейным фотоприемником (ЛФ), содержащим 1024 элемента размером 150×20 мкм с шагом 25 мкм.

Расстояние Δx между отраженными лучами в плоскости ЛФ прямо пропорционально толщине стенки трубы:

$$\Delta x = TV_x S;$$

$$S = 2 \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} [\arcsin (\sin \alpha / n)],$$

где T — толщина стенки; $V_x = 1$ — коэффициент увеличения оптической системы; S — постоянный коэффициент пропорциональности (чувствительность схемы к изменению толщины стенки); $n = 1,457$ — показатель преломления кварцевого стекла; α — угол падения света на поверхность трубы.

График функции $S(\alpha)$ приведен на рис. 3. Дифференцируя $\partial S / \partial \alpha$ и выполняя тождественные преобразования, получаем параметр S' , представляющий собой чувствительность схемы к наклону трубы:

$$S' = (1/\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}) [(n^2 \cos^2 \alpha) / (n^2 - \sin^2 \alpha) - \sin^2 \alpha].$$

Анализ функций $S(\alpha)$ и $S'(\alpha)$ позволяет найти оптимальный угол α_* , при котором чувствительность схемы к изменению толщины стенки до-

Рис. 2. Зависимость расстояния Δx между отраженными лучами от угла α падения света на трубу

стигает максимального значения $S(\alpha_*) = 0,795$, а чувствительность к наклону трубы равна нулю. Для кварцевого стекла $\alpha_* = 49,5^\circ$. При изменении угла падения на $\pm 1,5^\circ$ от оптимального ошибка измерения толщины стенки не превышает 0,15% (например, при $T = 2$ мм $\Delta T = 2,9$ мкм).

Схема измерения наружного диаметра.

В канале измерения наружного диаметра (рис. 2, б) источником излучения служит инфракрасный светодиод АЛ119 ($\lambda = 0,96$ мкм) 9 с мощностью излучения 40 мВт, установленный в фокусе конденсора 10. Конденсор 10 формирует параллельный пучок излучения диаметром 50 мм, равномерно освещающий контролируемую трубу 11. Изображение трубы переносится телецентрической оптической системой 12-14 в плоскость ЛФ 15 с увеличением $V_y = 0,47\times$, обеспечивающим проекцию 50-миллиметровой зоны измерения на чувствительную площадку фотоприемника длиной 25 мм. Для увеличения поля зрения и уменьшения aberrаций проекционного объектива 14 («Индустар-4У») в схему введена полевая линза 12, значительно снижающая дисторсию и кóму в плоскости изображения. Диафрагма 13 обеспечивает телецентрический ход лучей в схеме. Графики поперечной aberrации в плоскости фотоприемника приведены на рис. 2, г. Расчетное значение aberrаций на поле 20 мм не превышает ± 3 мкм, экспериментальное — незначительно отличается от расчетного.

Алгоритм обработки сигнала. Зарегистрированные фотодиодными линейками сигналы подвергаются обработке с целью определения координат отраженных лучей в канале измерения толщины стенки и границ изображения в канале наружного диаметра. Обработка сигналов включает в себя четыре основные операции:

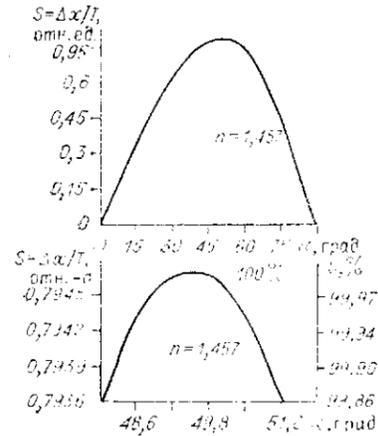
- коррекция отсчетов сигнала с учетом разброса чувствительности элементов линейки;
- преобразование отсчетов к удобному для обработки виду (в канале измерения наружного диаметра);
- аппроксимация дискретных отсчетов непрерывной функцией и выделение координат края изображения;
- коррекция координат выделенных точек с учетом остаточных полевых aberrаций оптической схемы.

Коррекция чувствительности элементов ЛФ осуществляется следующим образом. В отсутствие трубы все элементы засвечиваются равномерным пучком света. АЦП регистрирует отсчеты напряжения a_i^0 , пропорциональные чувствительности каждого элемента. Установка вычисляет и записывает в ОЗУ АЦП корректирующие коэффициенты $k_i = \text{const}/a_i^0$. В рабочем режиме отсчеты a_i^T сигнала, соответствующего изображению трубы, аппаратно умножаются на корректирующие коэффициенты

$$a_i = a_i^T k_i = a_i^T \text{const}/a_i^0.$$

Остаточная погрешность коррекции ограничена дрейфом параметров ЛФ и разрядностью АЦП и составляет 1%.

Полученные после коррекции отсчеты сигналов в каналах наружного диаметра и толщины стенки имеют разный вид. В первом канале сигнал представляет собой два импульса, форма каждого импульса соответствует распределению интенсивности света в поперечном сечении лазер-



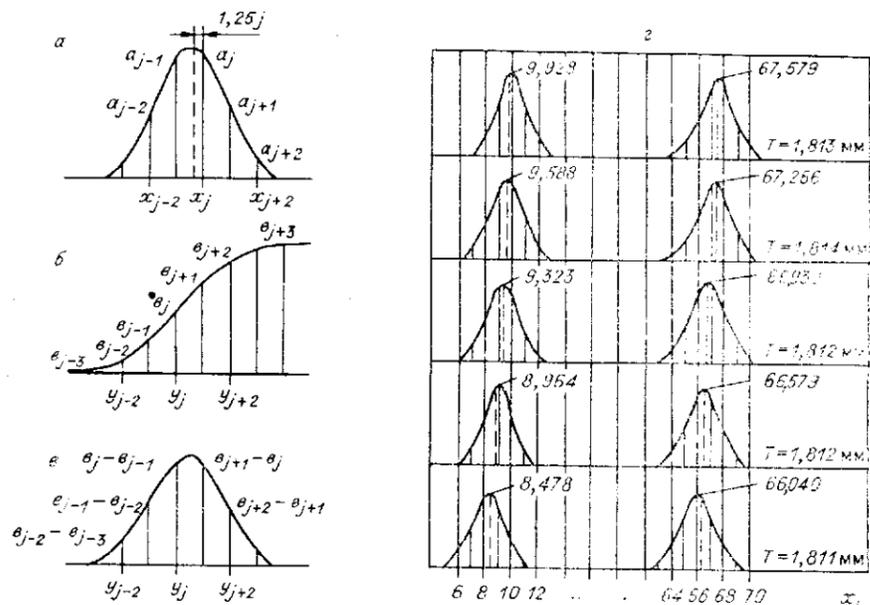


Рис. 4. Отсчеты сигналов с линейного фотоприемника:
 а — в канале измерения толщины стенки; б — в канале измерения наружного диаметра; в — дифференцированный сигнал в канале измерения наружного диаметра; г — при смещении изображения вдоль линейки

ного пучка (рис. 4, а) и описывается функцией Гаусса

$$a = a_* \exp[-(x/w)^2],$$

где a_* — амплитуда сигнала в центре импульса; w — полуширина импульса по уровню падения амплитуды в e раз. Во втором канале форма сигнала соответствует распределению света в теневом изображении непрозрачной детали (за исключением центрального участка изображения, где собираются преломленные лучи). В результате операции дифференцирования край изображения в канале наружного диаметра (рис. 4, б) преобразуется к виду импульсного отклика оптической системы и принимает форму, сходную с формой сигнала в канале измерения толщины стенки (рис. 4, в). В дальнейшем определение величины диаметра и толщины стенки выполняется по одному и тому же алгоритму и сводится к измерению координат импульсов на дискретно заданной шкале линейного фотоприемника. Центр импульса определяется сначала грубо, с точностью до шага линейки, затем точно, в пределах шага. Для уточнения применяется параболическая аппроксимация вершины импульса [4]

$$a(x) = A + Bx + Cx^2,$$

где A, B, C — коэффициенты, вычисляемые по методу наименьших квадратов. Результатом аппроксимации является уточняющая поправка к положению экстремума:

$$\xi_m \cong \frac{\sum_{i=-m}^m v_i a_{j+1}}{\sum_{i=-m}^m w_i a_{j+i}}. \quad (1)$$

Здесь

$$v_i = -i(4m^2 + 4m - 3);$$

$$w_i = -10m^2 - 10m + 30i^2;$$

v_i, w_i — весовые коэффициенты, определяемые радиусом окрестности аппроксимации; j — номер отсчета с максимальной амплитудой сигнала; a_{j+i} — амплитуда сигнала, соответствующего $(j+i)$ отсчету; m — радиус

окрестности, в которой выполняется аппроксимация. С учетом поправки координата центра импульса находится по формуле

$$x = x_i + 1.25\xi. \quad (2)$$

где x_i — координата, соответствующая номеру отсчета с максимальной амплитудой; ξ — уточняющая поправка, определяемая по формуле (1) по пяти отсчетам в окрестности x_i ; 1,25 — эмпирически найденный коэффициент, обеспечивающий минимальный разброс результатов измерений при изменении фазы отсчетов, вызванном смещением изображения вдоль линейки на дробную часть шага (рис. 4, з).

Коррекция остаточных полевых аберраций производится только в канале измерения наружного диаметра, где изображение трубы соизмеримо с размером рабочего поля оптической системы. Связь между координатами в плоскости предметов и плоскости изображения интерполируется степенным полиномом вида

$$y' = M_1y + M_2y^2 + M_3y^3, \quad (3)$$

где y' — координата в предметной плоскости; y — координата в плоскости изображения; M_1, M_2, M_3 — коэффициенты полинома.

Коэффициенты M_1, M_2, M_3 определяются в процессе настройки установки путем решения системы уравнений, получаемых при расположении детали в трех точках зоны измерения:

$$\left. \begin{aligned} D_d &= M_1(y_{R1} - y_{L1}) + M_2(y_{R1}^2 - y_{L1}^2) + M_3(y_{R1}^3 - y_{L1}^3); \\ D_d &= M_1(y_{R2} - y_{L2}) + M_2(y_{R2}^2 - y_{L2}^2) + M_3(y_{R2}^3 - y_{L2}^3); \\ D_d &= M_1(y_{R3} - y_{L3}) + M_2(y_{R3}^2 - y_{L3}^2) + M_3(y_{R3}^3 - y_{L3}^3); \end{aligned} \right\}$$

где D_d — действительное значение диаметра детали; y_{Ri}, y_{Li} — координаты правого и левого края изображения в i -й точке зоны измерения.

Окончательно диаметр трубы определяется как разность

$$D = y'_R - y'_L,$$

где y'_R, y'_L — координаты краев детали, вычисленные с использованием полинома (3), а толщина стенки

$$T = (x_R - x_L)M_x,$$

где x_R, x_L — координаты световых импульсов, найденные по формуле (2); M_x — экспериментально измеренный масштабный коэффициент.

Программное обеспечение. Программное обеспечение установки, написанное на языке Quasic, включает в себя четыре программы:

- 1) измерение геометрических параметров трубы в автоматическом режиме;
- 2) аттестация установки по мерам диаметра, толщины стенки и непрямолинейности оси;
- 3) контроль работоспособности узлов функциональной схемы;
- 4) определение параметров полевых аберраций оптической схемы.

Результаты экспериментальных исследований. Для исследования метрологических характеристик установки использовались следующие меры параметров: фрагменты кварцевых труб, аттестованные по толщине стенки; стальные калибры-пробки качества 7 по ГОСТу 24853-81 и отрезки кварцевых труб, аттестованные по наружному диаметру; мера отклонения от прямолинейности оси — металлический вал, изготовленный с заданным эксцентриситетом (1,5 мм).

Аттестация мер параметров выполнялась на микроскопе УИМ-24 и длиннере ИЗГ-5 с погрешностью ± 2 мкм. Отклонение от круглости в сечениях образцов труб составляло от 50 до 300 мкм, градиент диаметра в сечении трубы $\partial D/\partial \phi$ достигал 5 мкм/град, где D и ϕ — соответственно наружный диаметр и угол в полярной системе координат. Разнотолщинность стенок в сечении образцов труб составляла от 10 до 125 мкм.

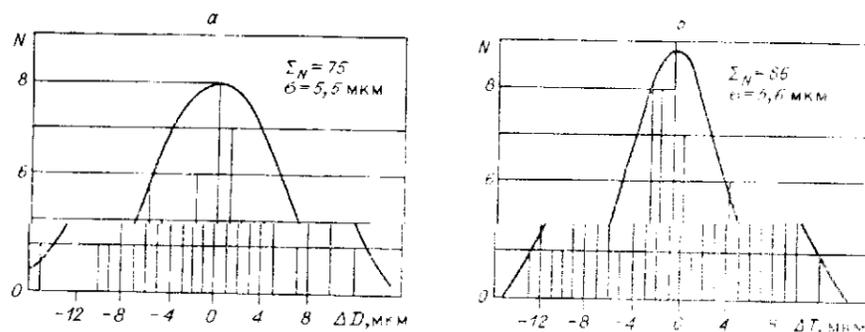


Рис. 5. Гистограммы погрешностей, полученные при исследовании двух установок «Родник»: а — в канале измерения диаметра; б — в канале измерения толщины стенки

При аттестации установки меры диаметра и толщины стенки ориентировались в зоне измерения по углу φ так, что направление измерения отличалось от направления аттестации образца не более чем на 3° . Для уменьшения влияния ребристой структуры стенок трубы измерения толщины стенки проводились в 12 точках в окрестности $\pm 3^\circ$ от аттестованной точки, за результат измерения принималось среднее арифметическое значение толщины стенки.

На рис. 5, а в форме гистограммы представлены результаты многократного измерения диаметров 19 образцов труб и четырех стальных калибров диаметрами от 15 до 40 мм, полученные при аттестации двух экземпляров установки. По горизонтальной шкале отложена разность ΔD между измеренным и действительным диаметрами образца, по вертикальной шкале — число реализаций того или иного значения ΔD . На рис. 5, б приведена аналогичная гистограмма результатов измерения толщины стенки 19 образцов труб. Максимальное отклонение результатов измерений от действительного значения параметра не превышает 16 мкм в канале наружного диаметра и 14 мкм в канале толщины стенки. С доверительной вероятностью $P = 0,93$ погрешность измерения установок в обоих каналах составляет ± 10 мкм. Систематических различий в результатах измерения диаметра стеклянных и стальных образцов обнаружено не было.

Технические характеристики установки «Родник»: диапазон измерения: наружного диаметра 15—40 мм, толщины стенки 1—4 мм; погрешность измерения ($P = 0,93$): наружного диаметра ± 10 мкм, толщины стенки ± 10 мкм, прогиба оси трубы ± 100 мкм; длина контролируемой трубы 500—1500 мм; шаг контролируемых сечений 100 мм; число точек измерения в каждом сечении 12; время измерения геометрических размеров трубы: в одном сечении 8 с, в десяти сечениях (труба длиной 1250 мм) 80 с; потребляемая мощность не более 460 Вт; площадь, занимаемая установкой, $3,0 \times 0,7$ м.

В установке предусмотрена возможность увеличения числа контролируемых точек в сечении до 72, при этом время измерений возрастает до 30 с/сечение.

Результатом измерения является паспорт на трубу (см. таблицу).

Испытания установки подтвердили стабильность ее метрологических характеристик в производственных условиях.

Труба № 564	Среднее значение	СКО	Максимальное значение	Минимальное значение
Наружный диаметр	19,897	0,036	19,978	19,828
Толщина стенки	2,004	0,013	2,032	1,983
Разнотолщинность	0,039	0,002	0,042	0,036
Площадь сечения	112,672	0,592 %	113,075	112,408
Некруглость	0,048		0,062	0,036
Прогиб			0,23	

Заключение. Созданная установка обеспечивает измерение с необходимой точностью геометрических размеров высококачественных опорных труб (погрешность измерения наружного диаметра и толщины стенки составляет ± 10 мкм, погрешность измерения прогиба не превышает 0,1 мм). В отличие от зарубежных аналогов установка выполняет абсолютные измерения во всем диапазоне контролируемых размеров без проведения калибровочных операций по эталонным образцам. Благодаря прямому доступу в шину микроЭВМ, оптимально составленной программе и оригинальному механизму привода измерительного блока производительность установки в 3—10 раз превышает производительность зарубежных систем.

Авторы выражают благодарность В. А. Денисову за руководство работой, Ю. М. Голубовскому за полезные советы по выбору оптимального угла падения света на трубу, Е. Г. Попову и С. Л. Медник, выполнившим абберрационные расчеты оптических схем, Ю. В. Чугую и П. В. Васильцу за проявленный интерес к работе и помощь в изготовлении электронных узлов установки, К. И. Дешле за разработку интерфейса приводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1522029 СССР. Способ измерения толщины стенки прозрачных труб и устройство для его осуществления/Н. И. Евсеев, Е. Г. Попов, С. Л. Медник.— Опубл. 15.11.89, Бюл. № 42.
2. Прайор Т. Р., Эрф Р. К., Гара А. Д. Применение лазеров для метрологии, контроля и машинного зрения в промышленности // ТИИЭР.— 1982.— № 6.
3. Богомолдов Е. П., Василец П. В., Кривенков Б. Е. и др. Фотодиодный оптико-электронный измеритель размеров «Сенсор» // Автометрия.— 1989.— № 5.
4. Краснов В. П., Сахно С. П., Тымчик Г. С. Алгоритм поиска экстремальных значений видеосигнала ПЭС-приемников // Изв. вузов. Приборостроение.— 1986.— № 4.

Поступила в редакцию 26 октября 1989 г.

УДК 621.396.967.029.7(024) : 621.37

С. АЛИШЕРОВ, А. В. УШАКОВ
(Ленинград)

АЛГЕБРАИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Введение. Постановка задачи. К непрерывным газовым лазерам (ЛГ), используемым в составе лазерных измерительных локационных систем [1—3] и принадлежащим некоторому классу эквивалентности по мощности, длине волны, расходимости и структуре мод излучения [3, 4], предъявляются жесткие требования по временной и пространственной стабильности оси диаграммы направленности (ОДН) лазерного излучения.

© 1990 Алишеров С., Ушаков А. В.