

пересечения оси кругломера и линии перемещения щупа измерительного датчика коррекцией амплитуды найденного из решения (9) эксцентриситета E по формуле (26) из [5].

Предварительное центрирование детали с погрешностью до 0,5 мм практически всегда может быть выполнено с визуальным контролем вручную или при помощи простейших устройств грубого центрирования (патрона, концентрических кругов на базовом столе и др.). При этом погрешности нового метода даже для наиболее сложных с точки зрения измерений формы профилей (см. табл. 4) не превышают нескольких сотых долей микрометра. Поэтому предложенный здесь метод позволяет корректно выполнять измерения формы профиля поперечных сечений как с малыми, так и с существенными отклонениями от круглости «без оглядки» на точность предварительного центрирования и спектр контролируемого профиля.

Описанные методы измерений реализуются в уникальном математическом обеспечении компьютеризированных стандов серии «Эталон» [4], предназначенных для контроля формы тел вращения и изделий овально-бочкообразной формы (поршней, кулачков, валов, пальцев, роликов, в том числе подвергшихся сильному износу).

Л и т е р а т у р а

1. **Авдулов А. Н.** Контроль и оценка круглости деталей машин. М. Изд-во стандартов, 1974.

2. **Сысоев Ю. С.** Координатные методы определения параметров средней окружности при анализе профиля реальной поверхности // Измерительная техника. 1995. № 10. С. 22—25; **Cysoev Yu. S.** Coordinate methods of determining average-circle parameters in actual surface profile analysis // Measurement Techniques. 1995. V. 38. N 10. P. 1108—1114.

3. **Захаров О. В., Бржозовский Б. М.** О точности центрирования при измерении на кругломерах // Измерительная техника. 2006. № 11. С. 20—22; **Zakharov O. V., Brzhozovskii B. M.** Accuracy of centering during measurement by roundness gauges // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 11. P. 1094—1097.

4. **Никольский А. А., Кацевич В. Л., Ходнев Н. Н.** Разработка автоматизированного станда для измерения геометрических параметров поршневых изделий // Труды МЭИ. 1997. Вып. 675. С. 59—65.

5. **Никольский А. А., Королев В. В., Муринец Д. Ю.** Особенности контроля профиля поперечных сечений поршней на кругломерах с образцовым вращением шпинделей // Измерительная техника. 2010. № 2. С. 28—35; **A. A. Nikol'sky, V. V. Korolev, D. Yu. Murinets.** Features in the of the control cross-sectional profile of pistons on out-at-round gauges with model rotation at the spindle // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 2. P. 156—165.

6. **Мак-Кракен Д. Д.** Численные методы и программирование на Фортране. М.: Мир, 1977.

Дата принятия 25.02.2010 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.7.08:535.231

Метод визуального контроля параметров пучков лазерного излучения на длинах волн 0,3—10,6 мкм при помощи оптически бистабильной среды Al-VO_2 -Д (диэлектрик)

А. С. ОЛЕЙНИК, А. В. ФЕДОРОВ

Саратовский государственный технический университет, Саратов, Россия,
e-mail: Alexanderfyodorov@pochta.ru

Описан экспрессный метод визуального контроля параметров пучков лазерного излучения на длинах волн 0,3—10,6 мкм при помощи визуализатора ВИ-1, экраном которого служит реверсивная оптически бистабильная среда Al-VO_2 -Д (диэлектрик). Среда обладает тремя градациями яркости и цветовой контрастности изображения, а каждой градации соответствует определенная плотность энергии (мощности) регистрируемого излучения.

Ключевые слова: метод визуального контроля, лазерное излучение, визуализатор, диоксид ванадия, фазовый переход.

The express method of laser radiation beams parameters at wavelengths 0,3—10,6 mkm using the radiation visualiser VR-1 with a reversible optically bistable medium Al-VO_2 -D (dielectric) as a screen, is described. The medium has three brightness and color contrast of the image gradations and certain energy (power) density of registered radiation corresponds to each gradation.

Key words: visual control method, laser radiation, visualiser, vanadium dioxide, phase transition.

Для лазерной технологии главными факторами являются стабильность пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения. При техническом диагностиро-

вании приходится измерять плотность энергии (мощности) излучения в ближней и дальней зонах, распределение плотности энергии (мощности) по сечению пучка, угловую расхо-

димост и линейный размер пучка. Разработка, изготовление, юстировка лазеров сопровождаются определением пространственной структуры, связанной с набором возбуждающихся мод, положения оси диаграммы направленности, контролем искажений лазерных пучков, вызываемых различными элементами оптических систем. Наибольшие трудности при выполнении этих задач возникают в инфракрасной (ИК) области спектра.

Для реализации метода визуального контроля параметров пучков лазерного излучения разработан преобразователь изображения в видимой и ИК-областях спектра на основе реверсивной оптически бистабильной среды Al-VO₂-Д (диэлектрик) [1].

Конструктивно преобразователь изображения на основе указанной среды представляет диэлектрическую подложку, покрытую алюминиевым зеркалом, на котором последовательно расположены рабочий слой из VO₂ и наружный защитный диэлектрический слой. Рабочий слой содержит окисные слои: поверхностный из V₂O₅ и нижний из V₃O₅, V₂O₃, VO. Отношения толщин указанных слоев имеют следующие значения от их общей суммы: V₂O₅ — 5 %, VO₂ — 75 %, V₃O₅, V₂O₃, VO — 20 %, а оптические толщины слоев пленочной структуры с соответствующими названиями могут иметь соотношения: $n_1 d_1 = n_2 d_2 = 0,27$ и $n_3 d_3 = 0,115$, где $n_1 = 1,38 \dots 1,69$, $n_2 = 2,35$, $n_3 = 1,15$ — показатели преломления защитного слоя, оксидного слоя ванадия, алюминиевого зеркала, соответственно; d_1 , d_2 , d_3 — толщины пленочных слоев бистабильной среды, мкм. Среда может использоваться в различных условиях эксплуатации (на открытом воздухе, в условиях ионизирующих излучений) [2].

Реверсивная оптически бистабильная среда Al-VO₂-Д (диэлектрик) имеет два устойчивых состояния, каждое из которых характеризуется определенной цветовой окраской. Под действием оптического излучения среда нагревается и переходит из состояния с одной цветовой окраской в состояние с другой цветовой окраской. Контрастное изменение цвета среды обеспечивает уверенное визуальное считывание информации.

Принцип действия основан на фазовом переходе 1-го рода полупроводник—металл (ФППМ) в среде при ее нагреве в температурном диапазоне 50—83 °С и сопровождается скачкообразным изменением оптических и электрических параметров. Ширина петли термического гистерезиса, изменения коэффициента отражения и сопротивления при ФППМ для окисных пленок толщиной 80—140 нм составляет от 18 до 10 °С. При термостатировании среды внутри петли гистерезиса обеспечивается режим запоминания оптической информации. Скорость записи (изменения цвета) зависит от теплофизических и оптических характеристик среды и от энергетической экспозиции источника излучения [3].

Среды Al-VO₂-Д неселективны в диапазонах длин волн 0,337—3,39 мкм и 5,0—10,6 мкм, причем в каждом диапазоне из-за различного коэффициента поглощения они имеют соответствующую пороговую чувствительность.

Изменение коэффициента контраста преобразователя изображения от температуры носит гистерезисный характер и соответствует трем грациям яркости изображения. Заметим, что первая, вторая и третья градации яркости изображения экрана связаны с перегревом экрана относительно температуры термостатирования соответственно на 3, 6 и 9 °С.

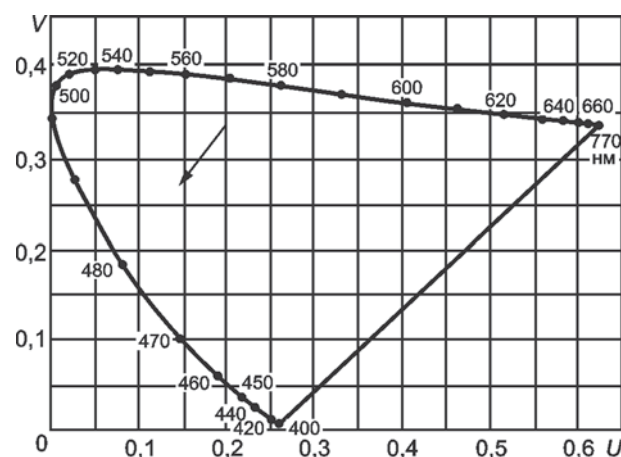


Рис. 1. Цветность среды Al-VO₂-AK-113Ф (100-115-190 нм) до и после фазового перехода на равноконтрастном графике

Контрастность K многоцветного изображения преобразователя может быть оценена согласно уравнению Шредингера—Мешкова [4]:

$$K = \sqrt{K_{\text{я}}^2 + K_{\text{цв}}^2},$$

где $K_{\text{я}}$, $K_{\text{цв}}$ — яркостная и цветовая контрастности изображения по отношению к фону.

Для трехслойной среды Al-VO₂-AK-113Ф (100-115-190 нм) с цветовым переходом до и после фазового перехода синезеленый → синий получаем значение

$$K = \sqrt{2,58^2 + 9,28^2} = 9,8.$$

Указанное значение контрастности одновременно обеспечивает не менее трех состояний (граций) по цветовому тону и яркости изображения отображаемой информации [5]. Так как преобразователь формирует изображение в отраженном свете, то его целесообразно использовать в условиях сильной освещенности.

Преобразователь изображения обладает одновременно цветовым и яркостным контрастом изображения, достаточным для цветового кодирования отражаемой информации, а угол обзора равен 130°. Большой угол обзора обеспечивает удобство и безопасность работы с преобразователем изображения при исследовании интенсивных потоков излучения, что особенно важно в ИК-области спектра.

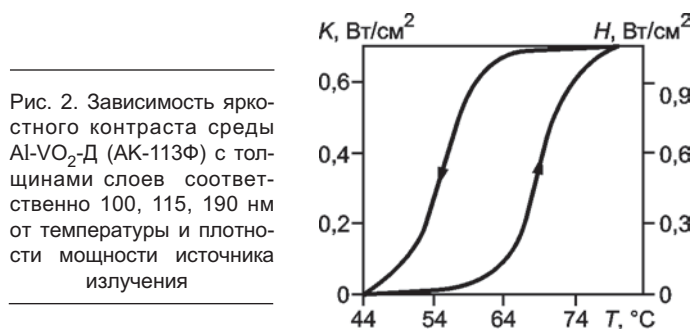


Рис. 2. Зависимость яркостного контраста среды Al-VO₂-Д (AK-113Ф) с толщинами слоев соответственно 100, 115, 190 нм от температуры и плотности мощности источника излучения

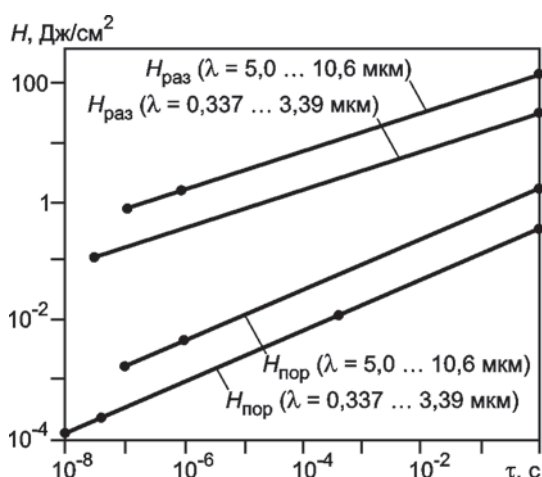


Рис. 3. Экспериментальные значения $H_{\text{пор}}$ и $H_{\text{раз}}$ преобразователя изображения на основе среды $\text{Al-VO}_2\text{-D}$ в диапазоне длительности импульса излучения $10^{-8} - 1$ с

На рис. 1 представлен равноконтрастный график в системе UVW, где показана цветность среды $\text{Al-VO}_2\text{-D}$ до и после фазового перехода с цветовым переходом зеленый $\rightarrow$ зелено-голубой [3].

Пороговая чувствительность визуализатора определяется энергетической экспозицией лазерного излучения, которая осуществляет нагрев среды $\text{Al-VO}_2\text{-D}$ на 3°C , что вызывает изменение коэффициента контраста среды на 0,2 и уверенно считывается зрительным анализатором (глазом).

На рис. 2 приведена зависимость яркостного контраста среды $\text{Al-VO}_2\text{-AK-113F}$ (100-115-190 нм) от температуры и плотности мощности источника излучения.

В диапазоне длительности импульса излучения $10^{-9} - 1$ с энергетическая экспозиция, вызывающая нагрев слоя VO_2 на 3°C , линейно возрастает в диапазоне $9 \cdot 10^{-5} - 0,3$ Дж/см² на длинах волн 0,3—3,39 мкм и в диапазоне $1,35 \cdot 10^{-4} - 0,45$ Дж/см² на длинах волн 5,0—10,6 мкм. В режиме адиабатической засветки, когда длительность импульса $\tau \leq 4 \cdot 10^{-8}$ с на длинах волн 0,3—3,39 мкм и 5,0—10,6 мкм, изменению яркостного контраста среды $\text{Al-VO}_2\text{-D}$ при его значениях 0,2; 0,4; 0,6 соответствует энергетическая экспозиция регистрируемого излучения соответственно $9 \cdot 10^{-5}$; $1,8 \cdot 10^{-4}$; $2,7 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² и $4 \cdot 10^{-4}$; $8,1 \cdot 10^{-4}$; $1,2 \cdot 10^{-3}$ Дж/см² [3].

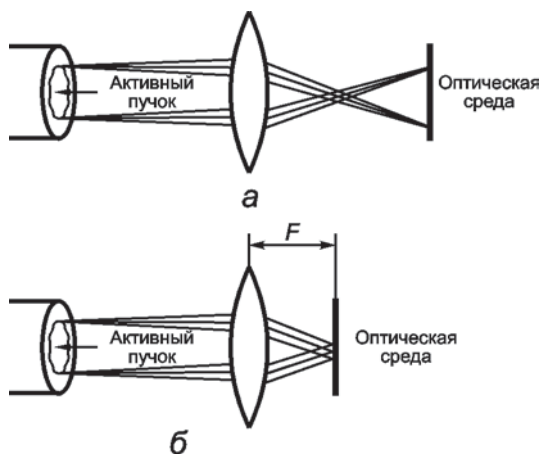


Рис. 4. Условия фокусировки при визуализации картины излучения лазера в ближней (а) и дальней (б) зонах

На рис. 3 приведена в режиме памяти пороговая $H_{\text{пор}}$ и предельно допустимая $H_{\text{раз}}$ энергетические экспозиции экрана визуализатора ВИ-1 в зависимости от длительности импульса излучения на длинах волн 0,3—3,39 мкм и 5,0—10,6 мкм.

Экспериментальные значения пороговой чувствительности $H_{\text{пор}}$ и порога разрушения $H_{\text{раз}}$ среды $\text{Al-VO}_2\text{-D}$ в режиме памяти исследовались на рабочем эталоне (РЭ) единицы энергии импульсного лазерного излучения в диапазоне длин волн 0,3 и 12,0 мкм [6] и на РЭ единицы максимальной мощности импульсно-модулированного излучения на длине волны 1,06 мкм [7]. Максимальное значение неравномерности зонной чувствительности среды не превышало 3,3 %.

Структурные исследования показали, что окисный слой среды представляет собой двухмерную поликристаллическую пленку на основе VO_2 с кристаллитами столбчатой формы высотой 70—140 нм, равными толщине пленки, и с размерами в плоскости пленки 50—140 нм, соответственно.

Разрешающая способность преобразователя изображения определяется размером кристаллита оксидной пленки ванадия порядка 0,1 мкм. Максимальная разрешающая способность в режиме адиабатической засветки и на длинах волн 1 и 10,6 мкм составляет не менее 1000 и 100 мм⁻¹, соответственно. Высокое разрешение сохраняется до длительности импульса излучения $\tau_i \leq 10^{-6}$ с. Структуру поперечных мод лазерного излучения изучают визуально на поверхности преобразователя, работающего в режиме внутренней памяти. Относительное распределение плотности энергии (мощности) по сечению лазерного луча определяют по трехцветной картине изображения. При этом для фокусировки на пленку VO_2 ближней (рис. 4, а) или дальней (рис. 4, б) зон излучения используют линзы [8].

В случае необходимости для детального анализа изображения на поверхности среды используют микроскоп.

Суть экспрессного метода контроля параметров пучков лазерного излучения заключается в следующем.

1. Преобразователь изображения неселективен на длинах волн 0,3—3,35 и 5,0—10,6 мкм.

2. Преобразователь изображения имеет три значения сложного (одновременно яркостного и цветового) контраста изображения.

3. В условиях постоянного излучения каждому значению контраста соответствует определенная плотность излучения.

4. В условиях импульсной засветки каждому значению контраста соответствует определенная энергетическая экспозиция.

5. Неравномерность зонной чувствительности преобразователя изображения не превышает 3,3 %.

6. Относительное распределение плотности энергии (мощности) по сечению лазерного луча определяют по трехцветной картине изображения.

7. Разрешающая способность преобразователя изображения на длинах волн 0,3—3,35 мкм и 5,0—10,6 мкм в условиях адиабатической засветки составляет не менее 1000 и 100 мм⁻¹, соответственно.

8. Преобразователь изображения способен регистрировать пикосекундные импульсы.

9. Размер преобразователя изображения не имеет ограничений, так как он может быть составным.

Разработан визуализатор излучения ВИ-1 с диаметром рабочего поля экрана 90 мм, выполненного на основе пленочной среды $\text{Al-VO}_2\text{-D}$ [9]. Визуализатор предназначен для

Технические характеристики визуализатора оптического излучения ВИ-1

Режим работы	Режим памяти	Режим естественного охлаждения экрана
Плотность энергии, Дж/см ² , за время действия импульса излучения в диапазоне 10 ⁻⁹ —1 с на длинах волн, мкм 0,3—3,39 5,0—10,6	9 · 10 ⁻⁵ — 3 · 10 ⁻¹ 1,35 · 10 ⁻⁴ —0,45	6,9 · 10 ⁻⁴ —2,3 1 · 10 ⁻³ —10,3
Плотность мощности, Вт/см ² , на длинах волн, мкм 0,3—3,39 5,0—10,6	0,3—1,5 1,35—6,7	2,3—3,5 10,3—15,7
Диаметр рабочего поля экрана, мм	90	90
Неравномерность зоны чувствительности, %	0,1	0,1
Число градаций яркости и цветового тона	3	3
Контрастность изображения, не менее	9,8:1	9,8:1
Время стирания изображения, с, не более	1	1
Время хранения изображения, с	Не ограничено	—
Количество циклов запись — стирание информации, не менее	10 ¹⁰	10 ¹⁰
Потребляемая мощность, Вт, не более	30	—
Масса, кг, не более	3	1

экспрессного контроля пространственно-энергетических характеристик больших пучков лазерного излучения.

Прибор состоит из блоков регистрации и питания. Блок регистрации представляет собой плоскую металлическую конструкцию, в которой размещен преобразователь изображения. Регистрируемое излучение вызывает контрастное изменение цвета экрана (лицевой поверхности преобразователя изображения). Конструкция блока позволяет осуществлять быструю замену преобразователей изображения и предусматривает крепление на оптической скамье. Блок питания состоит из плоского корпуса, в котором размещены электронная схема с элементами управления и сигнализации. Он обеспечивает термостатирование электронагревателя блока регистрации для запоминания оптической информации и позволяет осуществлять регулировку чувствительности прибора. Блок регистрации можно использовать самостоятельно без источника питания, но в этом случае запоминание вводимой информации не обеспечивается.

В таблице приведены эксплуатационные данные визуализатора оптического излучения с программным терморегулятором. Спектральный диапазон визуализации 0,3—10,6 мкм.

Для экспрессного анализа характеристик интенсивных пучков лазерного излучения перед экраном визуализатора помещают набор калиброванных светофильтров и по конфигурации цветного рельефа экрана, отображающего границы изоэнергетических сечений лазерного излучения, с учетом коэффициента пропускания светофильтров определяют распределение энергии в сечении пучка. Аналогичного эффекта можно достичь изменением чувствительности визуализатора, которая зависит от разности температур $\Delta T = T_{\text{фп}} - T_{\text{тт}}$, где $T_{\text{фп}}$ — температура фазового перехода слоя VO₂, соответствующая изменению контраста среды на 0,2; $T_{\text{тт}}$ — температура термостатирования. Чувствитель-

ность можно менять, если изменять температуру термостатирования среды.

Программируемый терморегулятор обеспечивает термостатирование экрана визуализатора в диапазоне 44—72 °С. При температуре термостатирования, равной 44 °С, возникают максимальное закругление энергетической чувствительности и потеря эффекта внутренней памяти, но время сохранения изображения на экране визуализатора достаточно для визуального наблюдения.

Наиболее полной пространственно-энергетической характеристикой лазерного излучения является диаграмма направленности, т. е. угловое распределение энергии или мощности в лазерном пучке.

Практический интерес представляет распределение поля излучения в дальней зоне, когда форма распределения перестает зависеть от расстояния и можно говорить о сформировавшейся диаграмме направленности излучения. В качестве приближенной оценки границы дальней зоны принимают расстояние, превышающее d^2/λ , где d — диаметр излучающей апертуры лазера; λ — длина волны излучения. Ширину диаграммы направленности в дальней зоне количественно характеризуют углом расходимости лазерного излучения, который обычно нормируют при выпуске лазеров. На практике для определения расходимости используют метод сечений (рис. 5).

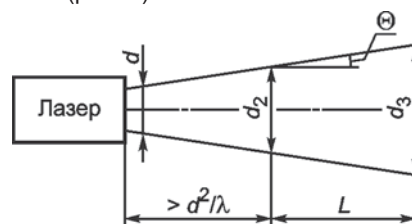


Рис. 5. Метод двух сечений

В методе сечений по изменившейся цвет области экрана определяют диаметры пучков d_1 и d_2 в двух поперечных сечениях дальней зоны, отстоящих одно от другого на расстоянии L , и вычисляют угол Θ по формуле

$$\Theta \approx (d_2 - d_1) / 2L.$$

Измерения диаметров d_1 и d_2 проводят одновременно или последовательно по одному и тому же критерию — заданному уровню интенсивности либо заданной доле мощности.

Таким образом, можно констатировать, что благодаря большой площади экрана визуализатора, высокой равномерности зонной чувствительности, возможности и даже целесообразности работы при высоком уровне внешней освещенности (что важно при регистрации излучения мощных импульсных лазеров в ИК-области спектра), а также автономности (возможности эксплуатации в лаборатории, в цехе, в полевых условиях) прибор получит широкое применение в метрологической практике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по проекту № 2.1.2/3424 аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 годы)».

Л и т е р а т у р а

1. Олейник А. С. Запись оптической информации в пленочных реверсивных средах на основе диоксида ванадия // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 8. С. 84—88.

2. Пат. 2321035 РФ. Преобразователь изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра / А. С. Олейник. // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 9.

3. Олейник А. С. Отображение и запоминание оптической информации на пленках диоксида ванадия: монография. Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2006.

4. Большухин В. А., Сошин Н. П. Повышение контрастности изображения на экране многоцветной индикаторной ЭЛТ // Электронная техника. Электривакуумные и газоразрядные приборы. 1978. Вып. 7. С. 65—70.

5. Литвак И. И., Ломов Б. В., Соловейчик И. Е. Основы построения аппаратуры отображения в автоматизированных системах / Под ред. А. Я. Брейтбарта. М.: Сов. радио, 1975.

6. ГОСТ 8.275—2007. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений средней мощности лазерного излучения и импульсного лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 12,0 мкм.

7. ГОСТ 8.443—81. ГСИ. Средства измерений максимальной мощности моноимпульсного и импульсно-модулированного лазерного излучения образцовые. Методы и средства проверки.

8. Хирд Г. Измерение лазерных параметров / Пер. с англ., под ред. Ф. С. Файзулова. М.: Мир, 1970.

9. Олейник А. С. Экспрессный метод контроля пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения с помощью термохромных материалов $Al-VO_2$ -Д // ПТЭ. 2002. № 5. С. 153—154.

Дата принятия 30.03.2010 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

531.768.53.087.6

Результаты сличений эталонных установок переменных давлений ГЭТ 131—81

С. Е. ВЕРОЗУБОВ, В. Я. СМЕРНОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии, С.-Петербург, Россия, e-mail: verozubov2520@mail.ru

Представлены результаты сличений эталонных установок, входящих в состав государственного эталона единицы давления для области переменных давлений ГЭТ 131—81. Показаны достоверность полученных результатов сличений установок с заявленными неопределенностями и воспроизводимость единицы давления.

Ключевые слова: эталонные установки, эталон сличений, частота, длительность, импульсное давление, коэффициент преобразования, стандартная неопределенность.

The comparisons results of standard instruments included in a structure of the state pressure unit standard for variable pressures area GET 131—81 are presented. The adequacy of obtained results with the announced uncertainties and reproducibility of the pressure unit are demonstrated for the different standard instruments.

Key words: standard instruments, transfer standard, frequency, duration, pulse pressure, sensitivity, conversion factor, standard uncertainty.

В соответствии с [1] в состав государственного эталона единицы давления для области переменных давлений входят пять эталонных установок: УГПД-9, УГПД-14, Фонтрон-12,

УБК-2М и УУТ-4. Подробно принцип действия и состав установок рассматривали, например в [2]. Следует отметить, что установка УГПД-9, применяемая для области частот