

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ $0,005^{\circ}\text{C}$ БЕТОННОГО ПОЛА В ТРАНСПОРТНОМ ТОННЕЛЕ № 1 ЦЕРН В МЕСТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИНКЛИНОМЕТРА

Н. С. Азарян^а, Ю. А. Будагов^а, М. В. Ляблин^а, А. А. Плужников^а,

Б. Ди Джироламо^б, Ж.-Кр. Гайде^б, Д. Мергелькуль^б

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Европейская организация ядерных исследований, Женева

Для обеспечения высокой чувствительности $\sim 10^{-9}$ рад прецизионного лазерного инклинометра (ПЛИ) при регистрации угловых колебаний поверхности Земли в области низких частот 10^{-6} – 10^{-4} Гц исследована температурная стабильность воздушной среды и бетонного пола транспортного тоннеля № 1 ЦЕРН: суточные изменения температуры воздушной среды в тоннеле составили $0,082^{\circ}\text{C}$ и его бетонного пола $0,005^{\circ}\text{C}$.

На основании проведенных исследований делается вывод о возможности наблюдения угловых деформаций поверхности Земли Луной и Солнцем при условии температурной стабилизации ПЛИ непосредственно массивным монолитом бетонного пола тоннеля.

To reach a sensitivity level of $\sim 10^{-9}$ rad for the Precision Laser Inclinator (PLI) for the registration of the Earth surface angular oscillation in the low frequency band of 10^{-6} – 10^{-4} Hz, the temperature stability of the CERN Transfer Tunnel No. 1 has been investigated. The daily temperature variation was 0.082°C for the air and 0.005°C for the concrete floor.

The last result opened the possibility to observe the Earth surface inclination caused by Moon and Sun, if the PLI is thermally stabilized by the massive monolithic concrete floor of the tunnel.

PACS: 91.10.Nj; 07.60.-j; 42.88.+h

ВВЕДЕНИЕ

Для многих метрологических и физических задач требуется температурная стабилизация исследовательских установок [1, 2]. Создание искусственного микроклимата ограничивается техническими трудностями реализации эффективной теплоизоляции, отвода излишнего тепла от установки, обеспечения достаточной однородности температуры и др. В зависимости от задач достигнутая суточная температурная стабилизация современных термостатов соответствует уровню $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ [3, 4].

Для некоторых задач требуется еще более точная температурная стабилизация. К таким задачам относится температурная стабилизация чувствительного элемента прецизионного лазерного инклинометра (ПЛИ). При достигнутой точности измерения угловой спектральной плотности 10^{-10} рад/Гц^{1/2} влияние долговременных вариаций температуры ограничивает частотный диапазон применения ПЛИ [5–8].

В работе рассматриваются методы увеличения температурной стабилизации ПЛИ с целью расширения высокочувствительного применения ПЛИ в области крайне низких частот 10^{-6} – 10^{-4} Гц.

НЕОБХОДИМОСТЬ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРЕЦИЗИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИНКЛИНОМЕТРА

В ПЛИ в качестве реперной поверхности, относительно которой измеряются угловые наклоны земной поверхности, используется горизонтальная поверхность жидкости. На рис. 1 показана упрощенная схема измерения в ПЛИ. Лазерный луч направляется на поверхность жидкости под небольшим углом $\theta = 2,5 \cdot 10^{-2}$ рад. В основном это мотивируется необходимостью создания оптической схемы, в которой исключается попадание отраженного лазерного луча обратно в лазер и тем самым минимизируется изменение его параметров.

Лазерный луч, отражаясь от поверхности жидкости, регистрируется позиционно-чувствительным квадрантным фотоприемником.

При наклоне основания кюветы с жидкостью на угол ϑ в силу сохранения жидкостью горизонтальности происходит наклон на угол 2ϑ отраженного луча, что смещает пятно лазерного луча на квадрантном фотоприемнике.

В приложении определено смещение h пятна лазерного луча на квадрантном фотоприемнике в ПЛИ, происходящее из-за изменения температуры ΔT . Здесь мы предста-

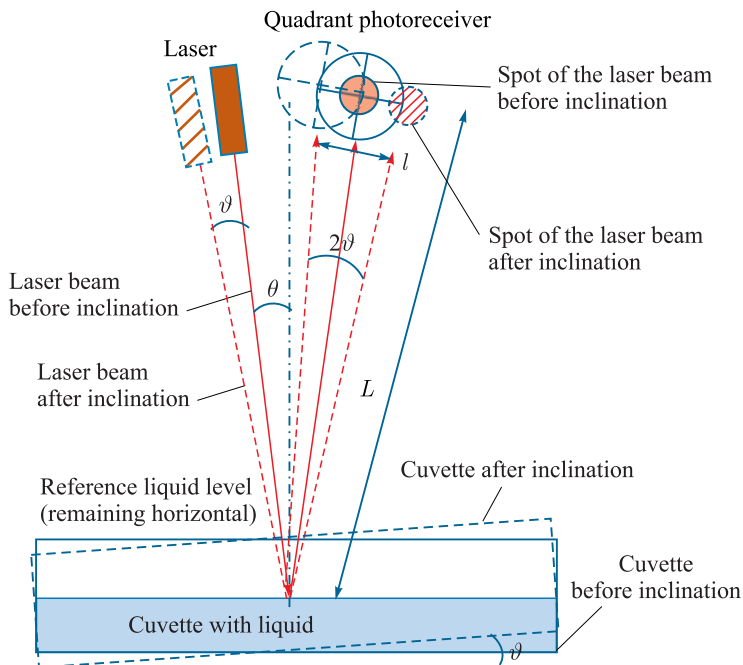


Рис. 1. Смещение l пятна лазерного луча на квадрантном фотоприемнике вследствие наклона ϑ основания ПЛИ

вляем конечный результат:

$$h = 2\theta\delta\beta\Delta T, \quad (1)$$

где δ — толщина слоя жидкости; β — коэффициент объемного температурного расширения жидкости; ΔT — изменение температуры.

Учитывая, что при наклоне земной поверхности на угол ϑ угол наклона лазерного луча после отражения от поверхности жидкости составит удвоенную величину 2ϑ (см. рис. 1), определим величину смещения l лазерного луча на квадрантном фотоприемнике. Зная расстояние L , пройденное лазерным лучом после отражения, находим $l = 2\vartheta L$.

Приравняв найденное значение l к величине h , определим зависимость между изменением температуры ΔT и «соответствующего» ему угла наклона земной поверхности ϑ в ПЛИ:

$$2L\vartheta = 2\theta\delta\Delta T, \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{L\vartheta}{\theta\delta\beta}. \quad (3)$$

Для угла наклона поверхности Земли $\vartheta = 10^{-9}$ рад при $L = 0,5$ м, $\beta = 6 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [9], $\theta = 2,5 \cdot 10^{-2}$ рад, $\delta = 4 \cdot 10^{-3}$ м получим $\Delta T = 8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Достижение такой температурной стабильности за сутки при помощи активных термостатных методов на данный момент технически невозможно.

В качестве пассивного элемента, сохраняющего температуру в работе [10], нами предложено использовать скальный грунт. Для проверки этого предложения были проведены прямые измерения температуры воздушной среды и бетонного пола в условиях транспортного тоннеля №1, расположенного в ЦЕРН на глубине 15 м.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

При измерении температурной стабильности использовался термистор с сопротивлением 100 Ом при 20 °С. Температура измерялась при помощи моста Уинстона по схеме на рис. 2.

Все сопротивления R , используемые в мосте Уинстона, были одного значения 100 Ом.

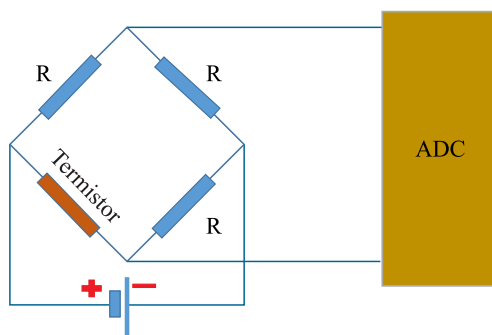


Рис. 2. Схема измерения температуры при помощи термистора, включенного в цепь моста Уинстона

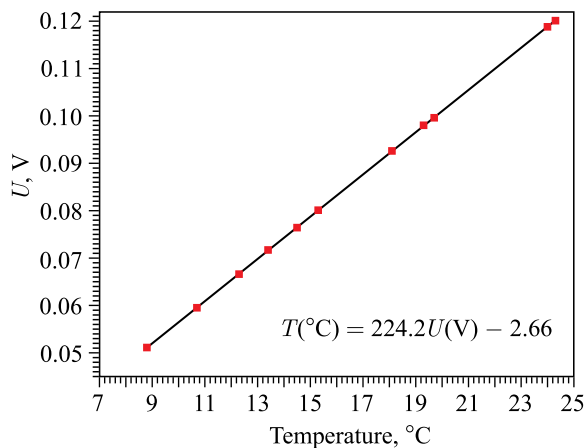


Рис. 3. Зависимость сигнала с термистора от внешней температуры

Для перевода данных измерения в вольты в градусы Цельсия использовался экспериментальный график зависимости сигнала с моста Уинстона от температуры.

Температура измерялась цифровым термометром с точностью $0,1^{\circ}\text{C}$. Сигнал с моста Уинстона измерялся мультиметром FLUK287 с точностью 10 мкВ [11]. Измерение температуры цифровым термометром вблизи термистора и сигнала с моста Уинстона осуществлялось одновременно. На рис. 3 показана зависимость сигнала с термистора от внешней температуры.

Экспериментальные данные аппроксимировались зависимостью

$$T(^{\circ}\text{C}) = 224,2U(\text{В}) - 2,66. \quad (4)$$

Как видно, экспериментальная зависимость сигнала с термистора от температуры линейна в диапазоне температур от 9 до 24°C . Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек температуры от линейной зависимости формулы (4) составило $0,8 \cdot 10^{-4}^{\circ}\text{C}$ и, соответственно, экспериментальных точек с термистора $0,8 \cdot 10^{-4}\text{ В}$.

Для регистрации сигнала с моста Уинстона при измерении температурной стабильности использовался стабилизированный 24-битный АЦП Rudnev & Chilyaev LA-I24-3 с шумом измерения $1,3\text{ мкВ}$ [12]. Время одного измерения составило $0,656\text{ с}$.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ И БЕТОННОГО ПОЛА В ТРАНСПОРТНОМ ТОННЕЛЕ № 1

На рис. 4 показаны суточные изменения температуры воздушной среды в транспортном тоннеле № 1 с 23 по 24 июня 2016 г.

Амплитуда изменения температуры составила $\Delta T_a = 0,082^{\circ}\text{C}$. Основной вклад в нестабильность температуры воздушной среды определяется наличием воздушного обмена с внешней средой.

На рис. 5 показано изменение температуры бетонного пола в транспортном тоннеле № 1 с 21 по 22 июня 2016 г. Для измерения температуры пола термистор помещался

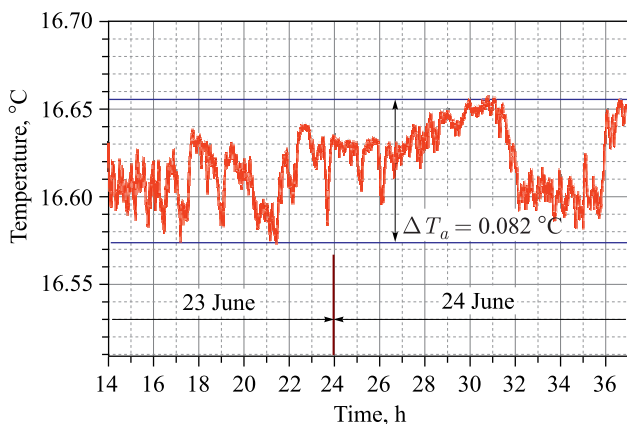


Рис. 4. Суточное изменение температуры воздуха в транспортном тоннеле №1 с 23 по 24 июня 2016 г.

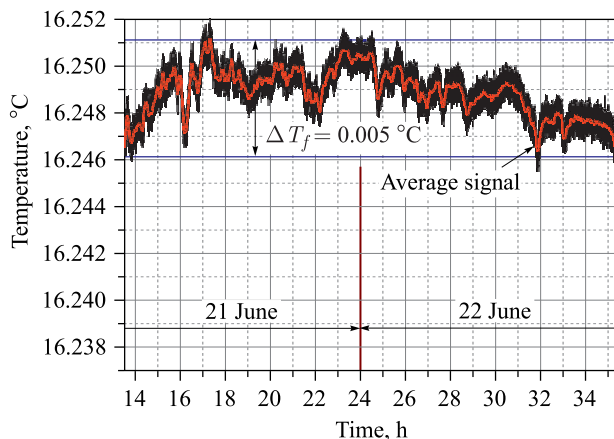


Рис. 5. Суточное изменение температуры бетонного пола в транспортном тоннеле №1 с 21 по 22 июня 2016 г.

в высверленное в полу отверстие и сверху дополнительно теплоизолировался поролоном от внешних колебаний температуры воздуха в ТТ1.

Амплитуда изменения температуры за сутки составила $5 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$.

На рис. 6 и 7 показаны результаты фурье-анализа колебания температуры воздушной среды и бетонного пола транспортного тоннеля №1 по данным рис. 4 и 5.

Как видно из рис. 6, 7, начиная с частоты 0,1 Гц для воздушной среды и с $4 \cdot 10^{-2}$ Гц для бетонного пола в измерениях преобладает белый шум регистрирующего АЦП. Это объясняется более низким по уровню шумом температурных колебаний пола по сравнению с воздушной средой. Что касается белого шума АЦП, то он исследован в нашей работе [6], где показано, что спектральная плотность этого шума на всех измеряемых частотах 10^{-5} –1 Гц приблизительно одинакова.

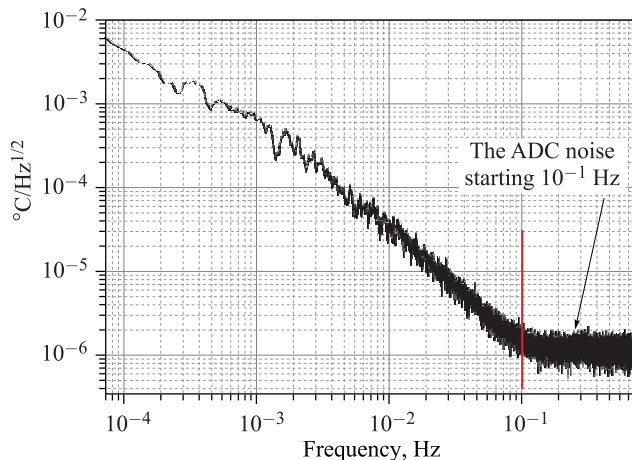


Рис. 6. Фурье-анализ изменений температуры воздуха в транспортном тоннеле №1 по данным рис.4

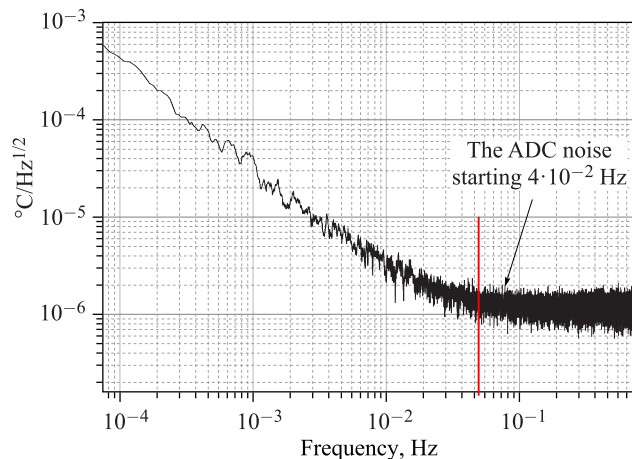


Рис. 7. Фурье-анализ изменений температуры бетонного пола транспортного тоннеля №1 по данным рис.5

ОБСУЖДЕНИЕ

По измерениям температурной стабильности воздушной среды в транспортном тоннеле №1 определим ограничение на минимально измеримую величину углового наклона земной поверхности $\vartheta_{ш.в}$, определяемую температурным шумом. Подставляя в формулу (3) найденное значение $\Delta T = 0,082^\circ\text{C}$, получим $\vartheta_{ш.в} = 0,5 \cdot 10^{-8}$ рад. Этот уровень шумов делает возможным регистрацию наклонов земной поверхности в интервале от $0,5 \cdot 10^{-7}$ до $1,8 \cdot 10^{-7}$ рад [13] вследствие ее деформации Луной и Солнцем с относительным разрешением не лучше 0,1.

Определим частотный диапазон угловых колебаний поверхности Земли, которые могут быть зарегистрированы ПЛИ с чувствительностью 10^{-9} рад в воздушной среде транспортного тоннеля №1. Из данных по спектральному составу температурных шумов

воздушной среды на рис. 4, используя формулу (3), определим, что указанная чувствительность ПЛИ достигается в частотном диапазоне 10^{-4} –1 Гц.

Существенно более высокая стабильность температуры наблюдается в бетонном полу транспортного тоннеля №1. Практически величина изменения температуры уменьшилась более чем в 15 раз по сравнению с воздушной средой. Это позволяет достичь пороговой чувствительности ПЛИ за сутки $\vartheta_{ш.в} = 0,3 \cdot 10^{-9}$ рад. Эта чувствительность делает возможным зарегистрировать феномен угловой деформации поверхности Земли Луной и Солнцем с относительным разрешением лучше 0,01.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализирован источник шумов, связанных с изменением температуры чувствительного элемента прецизионного лазерного инклинометра. Определены количественные критерии температурной стабильности чувствительного элемента ПЛИ.

Для достижения долговременной (сутки и более) точности измерения 10^{-9} рад необходима температурная стабильность чувствительного элемента ПЛИ $8 \cdot 10^{-3}$ °С. Экспериментально измерены суточные изменения температуры в транспортном тоннеле №1 ЦЕРН: воздушной среды 0,082 °С, бетонного пола $5,0 \cdot 10^{-3}$ °С.

По данным фурье-анализа зарегистрированных температурных колебаний воздушной среды оценен частотный диапазон 10^{-4} –1 Гц высокочувствительного (10^{-9} рад) применения ПЛИ.

При создании для ПЛИ условий температурной стабильности бетонного пола диапазон с высокой чувствительностью расширяется (10^{-6} –1 Гц), что позволяет наблюдать в угловых координатах явление деформации поверхности Земли от Луны и Солнца (типичная величина 10^{-7} рад) с относительным разрешением лучше 0,01.

Приложение

СМЕЩЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В ПЛИ, ВЫЗВАННОЕ ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Определим смещение лазерного луча при повышении температуры ΔT (рис. П.1, П.2).

Из-за повышения температуры увеличивается высота опорного основания. На этом основании были установлены и закреплены оптическое волокно от лазерного источника и коллиматор с фокусирующей линзой. В результате лазерный луч будет смещен относительно своего первоначального направления на расстояние

$$b = a_s k \Delta T, \quad (\text{П.1})$$

где a_s — коэффициент теплового расширения нержавеющей стали; k — высота положения луча над основанием кюветы.

Одновременно с изменением размеров основания коллиматора изменяются размеры оптического куба и уменьшается (после поворота лазерного луча кубом) смещение b на величину

$$c = (a_s k - a_g k) \Delta T, \quad (\text{П.2})$$

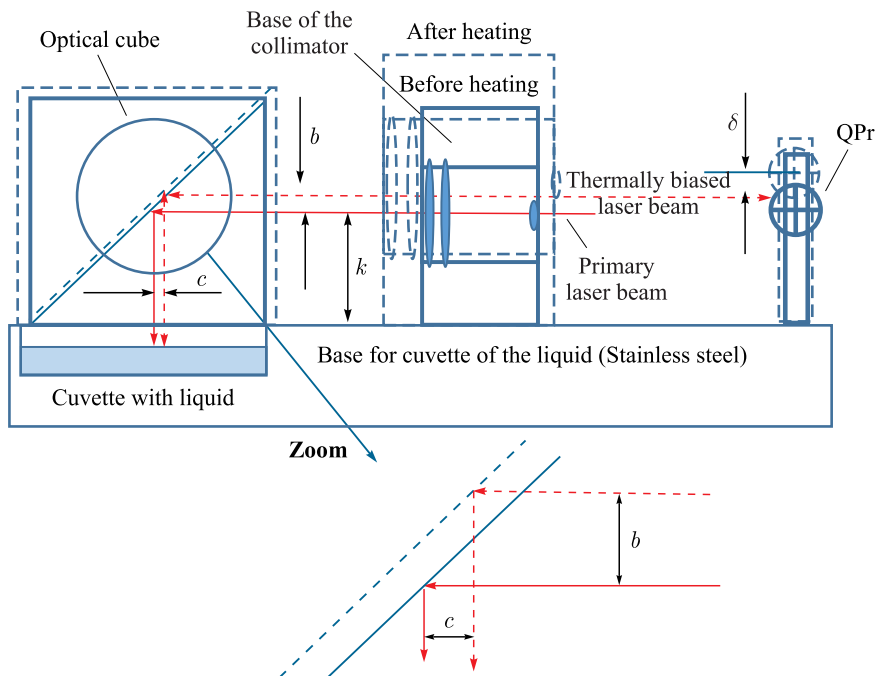


Рис. П.1. Смещение лазерного луча перед входом в кювету, вызванное изменением температуры

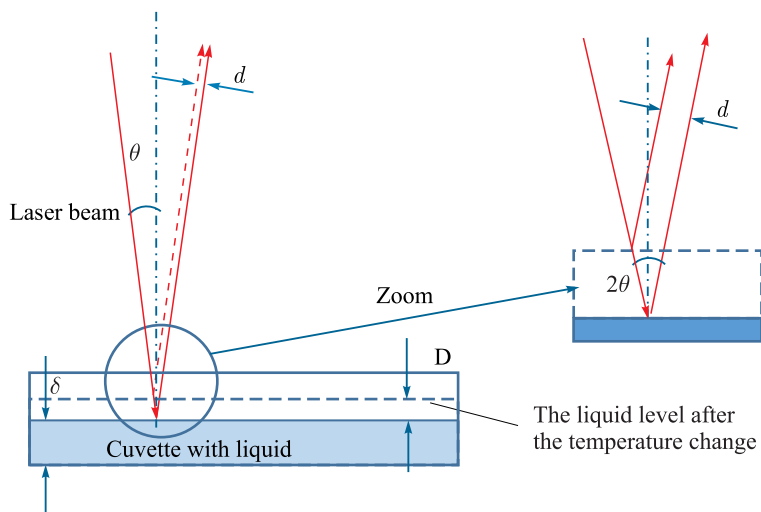


Рис. П.2. Смещение лазерного луча, отраженного от поверхности жидкости, из-за изменения температуры

где a_g — коэффициент теплового расширения стекла. И результирующее смещение c определяется разностью коэффициентов теплового расширения стекла a_g и нержавеющей стали a_s .

После отражения от жидкости лазерный луч отражается призмой в обратном направлении на квадрантный фотоприемник QPr. Для определения окончательного смещения лазерного луча относительно центра QPr найдем величину изменения высоты основания квадрантного фотоприемника (рис. П.1) в зависимости от изменения температуры. Поскольку луч после отражения от жидкости движется в обратном направлении, смещение, обусловленное стеклянной призмой, исчезает и остается только изменение высоты лазерного луча b , связанное с изменением высоты основания коллиматора.

Коэффициент теплового расширения a_{QPr} материала, из которого сделано основание для QPr, может быть отличным от такового для нержавеющей стали основания коллиматора, и в этом случае окончательное смещение μ лазерного луча на поверхности квадрантного фотоприемника становится

$$\mu = (a_s k - a_{QPr} k) \Delta T. \quad (\text{П.3})$$

При использовании нержавеющей стали в качестве материала основания фотоприемника можно констатировать отсутствие эффекта смещения лазерного луча на QPr.

Изменение температуры ΔT изменит объем жидкости и кюветы. Изменение объема жидкости значительно выше, чем изменение объема кюветы,

$$\frac{\Delta V_{liq}}{\Delta V_{cuv}} = \frac{\beta}{3a_s}. \quad (\text{П.4})$$

При использовании в качестве жидкости масла с $\beta = 6 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и нержавеющей стали для тела кюветы с $a_s = 9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ получается

$$\frac{\Delta V_{liq}}{\Delta V_{cuv}} = 22. \quad (\text{П.5})$$

Поэтому при оценке величины смещения лазерного луча можно пренебречь изменением объема кюветы из-за изменения температуры ΔT . Изменение объема жидкости будет проявляться в виде повышения уровня жидкости в кювете, и он будет отклонять лазерный луч на расстояние

$$D = \beta \delta \Delta T. \quad (\text{П.6})$$

Луч лазера после отражения от нового уровня жидкости будет смещен на расстояние

$$d = 2\theta \delta \beta \Delta T. \quad (\text{П.7})$$

Увеличение объема жидкости из-за изменения температуры сместит лазерный луч влево (рис. П.2), а изменение высоты k положения луча вызывает сдвиг вправо (рис. П.1). С учетом всего этого мы определяем результирующее смещение h лазерного луча:

$$h = 2\theta \delta \beta \Delta T \quad (\text{П.8})$$

для $\theta = 2,5 \cdot 10^{-2}$ рад, $\beta = 6 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\delta = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $a_s = 7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $a_g = 9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $k = 3,2 \cdot 10^{-2}$ м, получается

$$h = 6 \cdot 10^{-8} \Delta T. \quad (\text{П.9})$$

Благодарности. Авторы глубоко признательны Э.Манию Дюран за предоставленную возможность проводить исследования в транспортном тоннеле № 1 и А. Херти за помощь в экспериментах.

Группа ОИЯИ благодарит ВМВФ (Германия) за финансовую поддержку, которая позволила провести эксперименты, связанные с ПЛИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tolstikhina A. L. *et al.* Clean Boxes with Artificial Climate for Atomic Force Microscopy: New Possibilities for the Diagnosis of Nanoscale Objects // *Microelectronics*. 2009. V. 38, No. 2. P. 122–129.
2. Ludlow A. D. *et al.* Compact, Thermal-Noise-Limited Optical Cavity for Diode Laser Stabilization at $1 \cdot 10^{-15}$ // *Optics Lett.* 2007. V. 32, No. 6. P. 641–643.
3. Gromov D. S. Thermal Protection and Thermal Stabilization of Fiber-Optical Gyroscope Included in Strapdown Inertial Navigation System // *Sci. Techn. J. Inform. Technologies, Mechanics and Optics*. 2014. No. 2(90).
4. Verlaan A. L. *et al.* LISA Telescope Assembly Optical Stability Characterization for ESA // *Proc. of SPIE 8450, Modern Technologies in Space- and Ground-Based Telescopes and Instrumentation II*, Sept. 13, 2012.
5. Batusov V. *et al.* Recent Advances and Perspectives of the High Precision Laser Metrology. Presented at the Workshop “CLIC 2014”, CERN, Geneva, Feb. 3–7, 2014; JINR, E13-2014-21. Dubna: JINR, 2014.
6. Batusov V. *et al.* The Sensitivity Limitation by the Recording ADC to Laser Fiducial Line and Precision Laser Inclinator // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 7. P. 813–818.
7. Azaryan N. *et al.* The Precision Laser Inclinator Long-Term Measurement in Thermo-Stabilized Conditions (First Experimental Data) // *Ibid.* No. 4. P. 532–535.
8. Batusov V. *et al.* The Calibration of the Precision Laser Inclinator // *Ibid.* No. 7. P. 819–823.
9. *Physical Values: Handbook*. M.: Energoatomizdat, 1991.
10. Budagov J. *et al.* Air Temperature Stabilization in the Thermally Isolated Optical Laboratory // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11. P. 294–298.
11. <http://en-us.fluke.com/products/digital-multimeters/fluke-287-digital-multimeter.html>
12. http://www.rudshel.ru/board_with_ISA.html
13. Boerez J. *et al.* Analysis and Modeling of the Effect of Tides on the Hydrostatic Leveling System at CERN // *Survey Rev. Maney Publ.*, 2012. V. 44. P. 256–264.

Получено 30 июня 2017 г.