

## НАБЛЮДЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ СО СТОЯЧИМИ ЗВУКОВЫМИ ВОЛНАМИ

*В. Ю. Батусов, Ю. А. Будагов, М. В. Ляблин, А. Н. Сисакян*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В работе изучен процесс распространения луча лазера в воздушной среде со стоячей звуковой волной и обнаружено уменьшение неопределенности  $\sigma$  в пространственной локализации луча лазера в таком процессе. В исследованном случае распространения луча лазера в трубе при атмосферном давлении воздуха наблюдаемый эффект выражается как снижение величины  $\sigma$  с увеличением добротности резонатора (трубы).

The laser ray propagation in air media with standing acoustic wave was studied and the decrease of the laser ray space localization uncertainty  $\sigma$  was observed. In the case investigated of laser ray propagation inside a tube in atmospheric air the observed effect is expressed as a  $\sigma$  fall with the resonator (tube) quality rise.

PACS: 29.17.+w

### ВВЕДЕНИЕ

Применение лазерного луча в качестве координатной оси (реперной линии) открывает новые метрологические возможности при проведении высокоточной сборки исследовательского (или иного) оборудования [1–4]. Особый интерес вызывает применение лазерной методики для юстировки большого числа ускорительных модулей линейного коллайдера ТЭВ-ного диапазона.

Однако при распространении луча лазера в воздушной среде неопределенность  $\sigma(L)$ <sup>1</sup> в пространственной локализации лазерного луча возрастает с пройденной длиной  $L$  [5].

Среди причин этого явления выделим наиболее существенные:

- вариации оптического коэффициента преломления воздушной среды на длине  $L$ ;
- присутствие в воздушной среде взвешенной пыли и аэрогелей и др.

Помимо этих причин необходимо указать нестабильности сейсмического и промышленного происхождения, приводящие к неконтролируемой угловой подвижности основания лазерного источника, что, в свою очередь, влияет на угловую стабильность положения лазерного луча.

---

<sup>1</sup> $\sigma(L)$  обозначает среднеквадратичное отклонение в распределении измерений пространственной координаты оси лазера по прохождении расстояния  $L$ .

В работе [5] лазерный луч был помещен внутрь трубы длиной  $L$ . Было обнаружено, что на выходе луча из трубы  $\sigma_T(L)$  значительно уменьшается в сравнении с  $\sigma(L)$  в случае «без трубы»:

$$\sigma(L)/\sigma_T(L) \approx 10 \text{ для } L = 10 \text{ м.}$$

Последующие исследования выявили стоячие звуковые волны внутри трубы достаточно большой интенсивности звучания: на длинах до 10 м звук основной моды слышен непосредственно. Это находит естественное объяснение: труба, как объемный резонатор, «выбирает» из окружающего акустического шума широкого частотного диапазона волны с частотой основного тона и обертонов.

Представляется естественным предположить, что стоячие звуковые волны являются тем фактором, который снижает  $\sigma$  лазерного луча на выходе из трубы. Для проверки этого предположения были проведены эксперименты по выявлению зависимости между величиной  $\sigma$  и интенсивностью стоячей звуковой волны. Для этого концы трубы: а) оба были оставлены открытыми и б) были закрыты стеклянными окнами — и соответствующие величины  $\sigma$  были измерены.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Величины неопределенностей  $\sigma(L)$  и  $\sigma_T(L)$  в пространственной локализации луча лазера на расстоянии  $L$  от источника были измерены на экспериментальной установке, показанной на рис. 1 (подобная установка была использована в [5]).

Луч из источника «Лазер» по прохождении расстояния  $L$  регистрируется дуантным фотоприемником ДФп [6]; сигналы с ДФп поступают на амплитудно-цифровой преобразователь и далее на компьютер. Между источником «Лазер» и ДФп может быть установлена труба. В эксперименте использовались пластиковые трубы (длиной по 5 м) с внутренним диаметром 40 мм.

Труба устанавливалась на трех точечноподобных опорах в середине и на концах, чтобы минимизировать ослабление стоячих звуковых волн внутри трубы.

Фотоприемник ДФп расположен на опоре с микрометрическим винтом, регулирующим положение ДФп относительно луча лазера с точностью 3 мкм (на нониусе цена одного деления — 10 мкм). Сигналы  $U_1$  и  $U_2$  с ДФп (1 и 2 на рис. 1) измерялись с точностью  $\sigma_{\text{шум}} = 2$  мкВ. Разница  $\Delta U$  этих сигналов записывалась ПК.

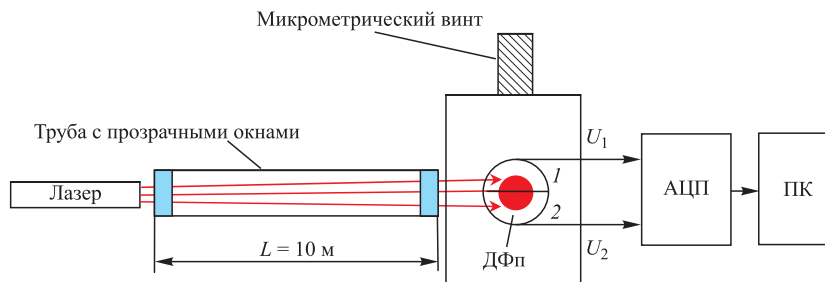


Рис. 1. Экспериментальная установка

Длительность одного цикла регистрации выбиралась относительно короткой ( $\approx 2$  мин), чтобы уменьшить воздействие шума сейсмического и промышленного происхождения. При длительности одного измерения 2,5 с в течение одного измерительного цикла производилось до 50 измерений.

Для калибровки фотоприемник смещался на расстояние  $D = 50$  мкм микрометрическим винтом поперек луча, и измерялся разностный сигнал  $\Delta U_k$ . Отношение  $\Delta U_k/D$  определило величину калибровочного коэффициента  $K = (52 \pm 3)$  мкВ/мкм.

На рис. 2 показана запись разностного сигнала  $\Delta U$  с ДФп для луча лазера, прошедшего через трубу длиной  $L = 10$  м (оба конца трубы закрыты стеклянными окнами).

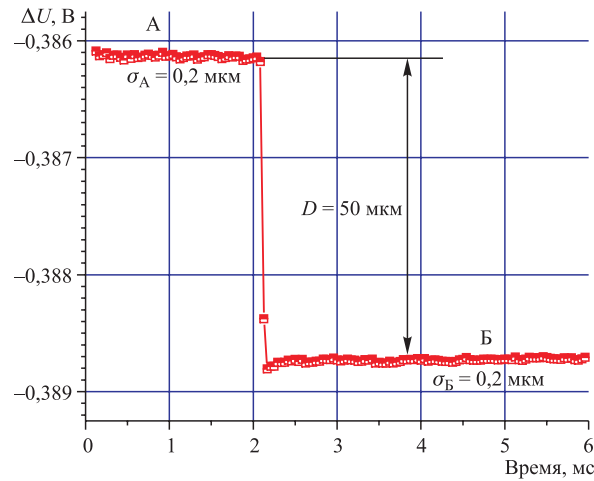


Рис. 2. Калибровочное смещение фотоприемника ДФп на 50 мкм

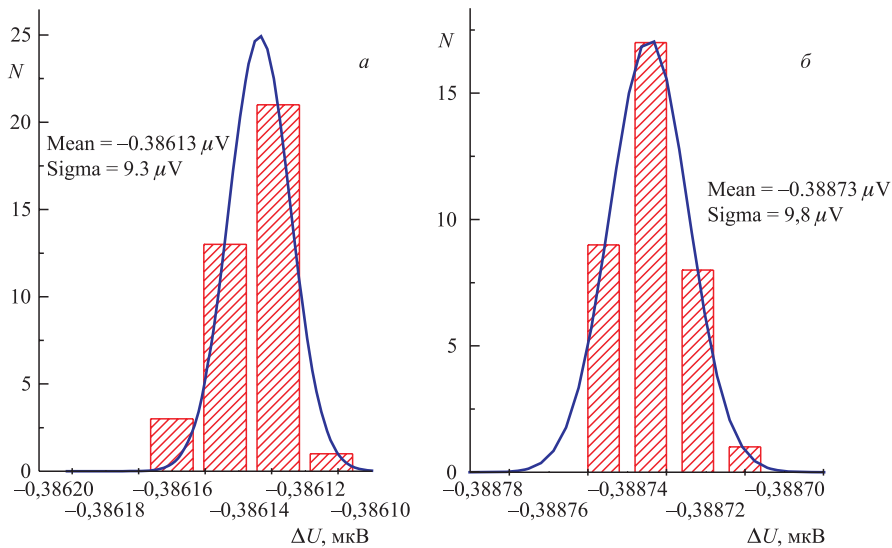


Рис. 3. Гистограммы, полученные из данных, соответствующих участкам А (а) и Б (б) на рис. 2

Данные, соответствующие участкам А и Б (рис. 2), спроецированы на ось  $\Delta U$  и аппроксимированы гауссовой функцией (рис. 3). По результатам фита вычислялись  $\sigma_A$  и  $\sigma_B$  в мкВ и затем при помощи калибровочного коэффициента они переводились в мкм. Эта процедура проводилась до и после калибровочного смещения для изучения влияния основания ДФп на стабильность регистрируемых данных. Измерения и последующие вычисления дали практически совпадающие величины,  $\sigma_A = (1,8 \pm 0,1)$  мкм и  $\sigma_B = (1,9 \pm 0,1)$  мкм, что означает отсутствие влияния калибровочного смещения (дрожания фотоприемника) на процесс измерения.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Интенсивность индуцированных звуковых колебаний зависит от добротности резонатора. Известно, что когда труба закрывается с одной стороны, амплитуда стоячей звуковой волны в ней возрастает из-за увеличения коэффициента отражения от заглушки. Другими словами, установка стеклянных окон в нашем эксперименте увеличивает добротность акустического резонатора и, соответственно, амплитуду стоячей звуковой волны в нем. Таким образом, для обнаружения зависимости неопределенности положения лазерного луча в трубе от интенсивности звучания стоячей звуковой волны достаточно измерить величины  $\sigma$

- в отсутствие трубы;
- в трубе;
- в трубе, один конец которой закрыт стеклянным окном;
- в трубе, оба конца которой закрыты стеклянными окнами.

В таблице представлены результаты измерений для трубы  $L = 10$  м и без нее.

### Результаты измерения величин $\sigma$ на длине распространения лазерного луча 10 м

Экспериментальные условия	$\sigma$ , мкм
Лазерный луч в воздухе в отсутствие трубы	$7,5 \pm 0,4$
Лазерный луч на выходе из трубы, оба конца открыты	$2,3 \pm 0,1$
Лазерный луч на выходе из трубы, один конец закрыт	$1,6 \pm 0,1$
Лазерный луч на выходе из трубы, оба конца закрыты	$0,20 \pm 0,01$

Данные таблицы подтверждают предположение, что увеличение добротности нашего акустического резонатора (трубы) вызывает значительное уменьшение погрешности в пространственной локализации луча на выходе из трубы.

## 3. ДРУГИЕ ИЗМЕРЕНИЯ; ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Корреляция величины  $\sigma$  и добротности резонатора свидетельствует о том, что рассеяние лазерного луча в воздухе внутри трубы, где присутствуют звуковые стоячие волны, снижается. «Физика» обнаруженного явления, как представляется, может состоять в выравнивании стоячими звуковыми волнами внутри резонатора оптических неоднородностей вдоль линии распространения лазерного луча.

В этом разделе приведены результаты измерений, осуществленных с целью непосредственного определения частот звуковых колебаний в трубе, индуцированных внешним широкополосным шумовым источником. Измерения выполнены для труб  $L = 34$  м и  $L = 5$  м.

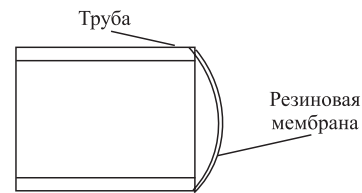
Рассмотрим следующие случаи:

1. При открытых концах трубы расчетная частота основной моды составляет  $\nu_1 = L/4V$ , где  $V$  — скорость звука в воздухе и  $L$  — длина трубы. Амплитуда стоячей волны минимальна (узел) в центре трубы и максимальна (пучность) на концах трубы.

2. При наличии на одном конце трубы заглушки и открытом втором конце расчетная частота основной моды  $\nu_2 = L/2V$ . Пучность расположена на открытом конце трубы и, соответственно, узел у закрытого конца.

3. При закрытых заглушками обоих концов трубы расчетная частота основной моды  $\nu_3 = \nu_1$ .

**Измерения при длине трубы 34 м: один конец закрыт заглушкой.** В этом случае ожидается стоячая волна с частотой основной моды  $\nu_0 \approx 2,4$  Гц. Она попадает в область инфразвуковых волн и не может быть детектирована обычным микрофоном с рабочим диапазоном 40–13000 Гц. Для детектирования инфразвуковых колебаний в качестве чувствительного элемента была использована тонкая резиновая мембрана. Она крепилась на одном из концов трубы и полностью закрывала ее торец (рис. 4).



Собственная частота колебаний мембраны зависит от ее натяжения и в эксперименте составляла  $\nu_m \approx 200$  Гц. Поскольку ожидаемая частота возбужденных стоячей звуковой волной колебаний мембраны была значительно ниже, чем  $\nu_m$ , то взаимодействие звуковых волн с мембраной происходило нерезонансным образом. При этом амплитуда смещения тонкой мембраны «соответствовала» амплитуде стоячей звуковой волны. Регистрация колебаний мембраны производилась по схеме, показанной на рис. 5.

Рис. 4. Расположение резиновой мембраны на конце трубы

Контролирующий лазерный луч отражался от примыкающей к трубе мембраны, регистрировался ДФп, и колебания интенсивности луча записывались амплитудно-цифровым

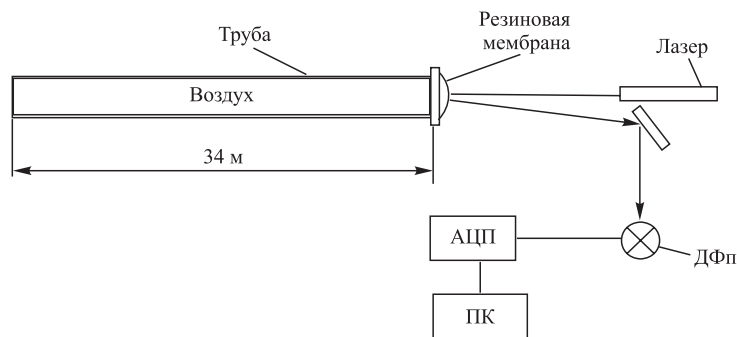


Рис. 5. Схема эксперимента с резиновой мембраной

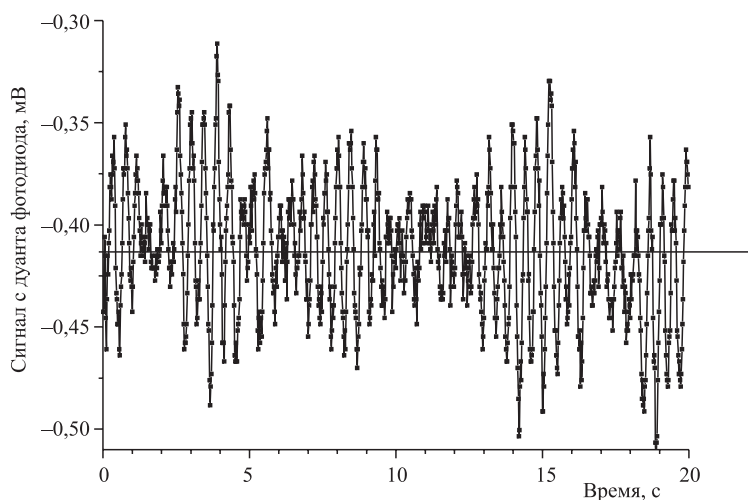


Рис. 6. Оциллограмма колебания резиновой мембраны;  $L = 34$  м

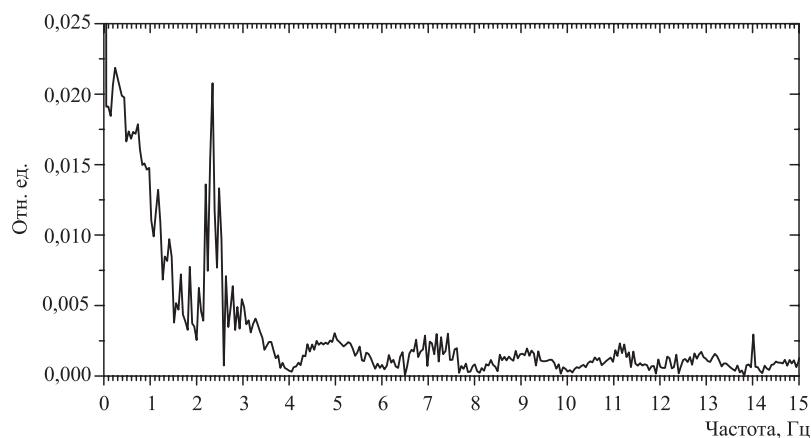


Рис. 7. Фурье-спектр частот колебаний резиновой мембраны, вызванных звуковыми стоячими волнами внутри трубы от внешних широкополосных шумовых источников

преобразователем и компьютером. Оциллограмма колебаний мембраны показана на рис. 6.

Фурье-спектр колебаний мембраны, рассчитанный по данным оциллограммы (рис. 6), представлен на рис. 7. Измеренная частота совпала с ожидаемой расчетной по величине:  $\nu_0 \approx 2,4$  Гц.

**Эксперимент при длине трубы 5 м; оба конца открыты.** В трубе  $L = 5$  м (рис. 8), открытой с двух сторон, возбуждается стоячая звуковая волна с расчетной частотой основной моды  $\nu_0 \approx 34$  Гц. Колебания данной частоты могут быть зарегистрированы при помощи микрофона.

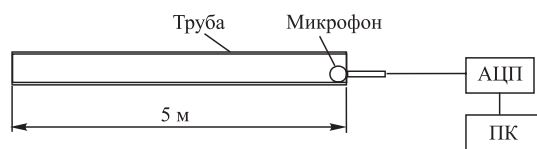


Рис. 8. Эксперимент с микрофоном при длине трубы 5 м

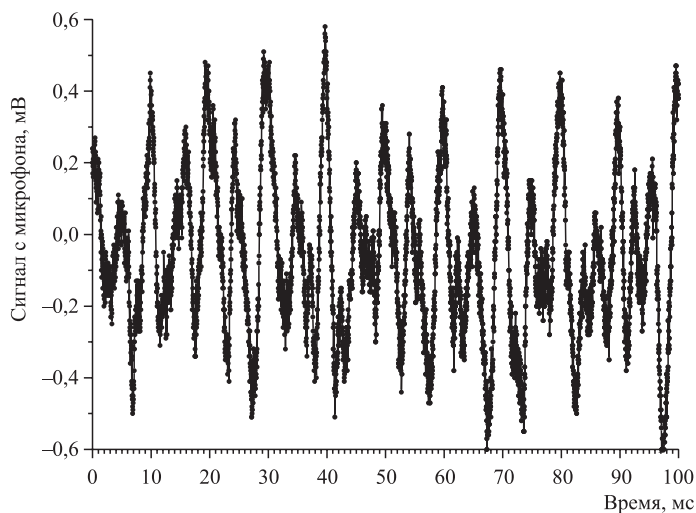


Рис. 9. Осциллограмма звуковых колебаний воздуха в трубе длиной 5 м

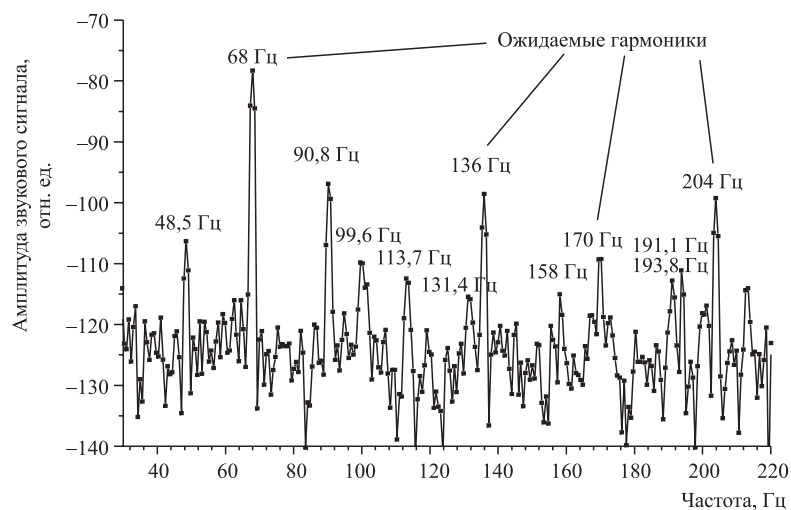


Рис. 10. Спектрограмма звуковых колебаний воздуха в трубе длиной 5 м

Микрофон помещался в один из концов трубы; сигнал с микрофона детектировался при помощи АЦП и компьютера. В эксперименте использовался микрофон SONY AF-V120 с частотным диапазоном регистрации 60–12000 Гц. Этот микрофон в своем

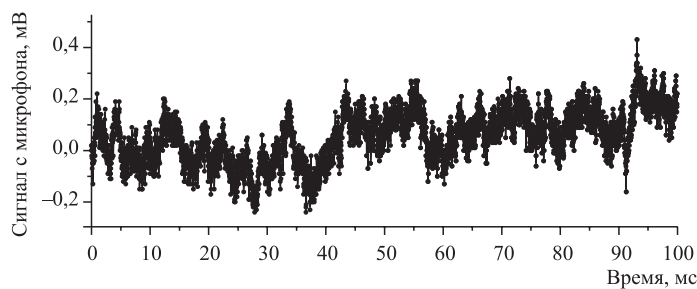


Рис. 11. Осциллограмма звуковых колебаний воздуха вне трубы

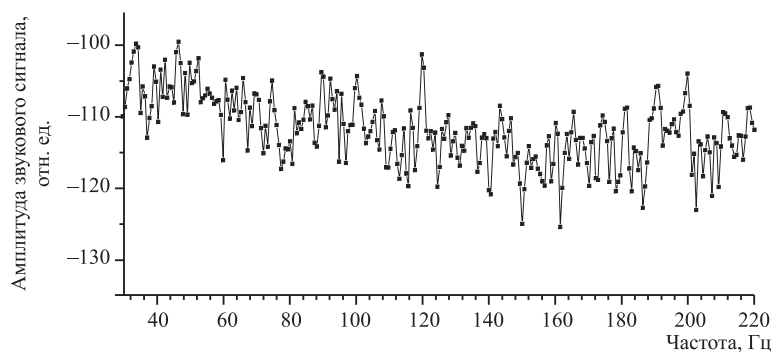


Рис. 12. Фурье-спектр звуковых колебаний воздуха вне трубы

рабочем диапазоне регистрирует вторую и последующие гармоники колебаний стоячей звуковой волны. Осциллограмма сигнала с микрофона показана на рис. 9.

Фурье-спектр сигнала с микрофона, рассчитанный по данным осциллограммы, представлен на рис. 10.

В соответствии с ожиданием зарегистрированы устойчивые вторая и последующие гармоники стоячей звуковой волны с частотой основной моды  $\nu_0 \approx 34$  Гц.

В качестве «референсных» величин были детектированы звуковые волны вне трубы. Осциллограмма и фурье-спектр представлены на рис. 11 и 12.

Сравнение данных (рис. 8–12) подтверждает наличие звуковых гармоник с ожидаемыми основной и обертовыми частотами в трубах с  $L = 34$  м и  $L = 5$  м и их отсутствие вне труб. Интенсивность резонансной стоячей волны значительно превышает уровень звуковых шумов вне трубы.

## ВЫВОДЫ

Стоячая звуковая волна внутри трубы, возбуждаемая внешними широкополосными звуковыми источниками, воздействует на процесс распространения луча лазера в этой трубе.



Обнаруженное явление регистрируется как ясно выраженная корреляция между улучшением добротности резонатора (трубы) и уменьшением неопределенности в пространственной локализации оси луча по выходе из трубы.

**Благодарности.** Авторы благодарны И. Н. Мешкову за критическое прочтение статьи и существенные коррективы, В. Д. Пешехонову, В. М. Романову и А. В. Сазоновой за обсуждение и интересные замечания, К. Лассеру — за содействие в проведении эксперимента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Batusov V. et al.* Comparison of ATLAS Tilecal Module No. 8 High Precision Metrology Measurement Results Obtained by Laser (JINR) and Photogrammetric (CERN) Methods // Part. Nucl., Lett. 2002. No. 4[113]. P. 36–50.
2. *Batusov V. Yu. et al.* Development and Application of High-Precision Metrology for the ATLAS Tile-Calorimeter Construction (Pre-Assembly Experience and Lessons). JINR, E13-2004-177. Dubna, 2004. Hardcopy at DESY.
3. *Batusov V. et al.* High Precision Laser Control of the ATLAS Tile-Calorimeter Module Mass Production at JINR // Part. Nucl., Lett. 2001. No. 2[105]. P. 33–40.
4. *Batusov V. et al.* On Laser Beam Fiducial Line Application for Metrological Purposes. JINR, E13-2007-98. Dubna, 2007.
5. *Batusov V. et al.* A Study of an Air Medium Influence on the Rectilinearity of Laser Ray Proliferation Towards the Using for Large Distances and High-Precision Metrology // Part. Nucl., Lett. 2007. V. 4, No. 1(137). P. 150–156.
6. [http://www.pacific-sensor.com/pages/qp\\_all.html](http://www.pacific-sensor.com/pages/qp_all.html)

Получено 25 марта 2009 г.