

УДК 681.586.5

**А.Л. Павлов<sup>1,2</sup>, Ю.Н. Пырков<sup>1,2</sup>, В.Б. Цветков<sup>2,3</sup>**<sup>1</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет), Москва, Россия<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова, Москва, Россия<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия

## **АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ**

Представлены результаты исследований, направленных на создание автоколлимационного измерителя скорости движения малоразмерных объектов. Диапазон измеряемых скоростей составил 0,1–180 м/с. При измерении высоких скоростей (от 1 до 180 м/с) точность определения скорости была не менее  $\pm 0,2$  м/с при временном разрешении 6 мкс, в случае измерения малых скоростей (до 1 м/с) точность определения скорости была не менее 5 см/с при временном разрешении 50 мкс.

**Ключевые слова:** эффект Доплера, волоконная оптика, измеритель скорости, гомодинамная схема, скорость пули, дистанционные измерения, интерферометрические схемы, ЛДИС.

**A.L. Pavlov<sup>1,2</sup>, Yu.N. Pyrkov<sup>1,2</sup>, V.B. Tsvetkov<sup>2,3</sup>**<sup>1</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (State University),  
Moscow, Russian Federation<sup>2</sup> A.M. Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russian Federation<sup>3</sup> National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute),  
Moscow, Russian Federation

## **AUTOCOLLIMATED DOPPLER VELOCITY METER**

We present results of research aim of which was to create autocollimated velocity meter for measuring small sized objects. Speed in the range from 0,1 to 180 m/s was measured. For high speed velocities precision of speed measurement was better than  $\pm 0,2$  m/s with a time resolution of 6  $\mu$ s. For low speed velocities (up to 1 m/s) precision of speed measurement was better than  $\pm 5$  cm/s with a time resolution of 50  $\mu$ s.

**Keywords:** Doppler's effect, fiber optics, velocity measurement, homodyne scheme, bullet speed, remote measurements, interferometric scheme, LDV.

### **1. Введение**

В широком круге задач научных исследований (метеорологии, изучении динамики детонационных процессов, анемометрии и т.д.) и производств (например, в сталепрокатной промышленности и военно-промышленном комплексе) требуются точные бесконтактные изме-

рения линейной скорости перемещающегося тела. Одной из хорошо зарекомендовавших себя методик является измерение скорости, основанное на эффекте Доплера [1].

В основе лазерных доплеровских измерителей скорости (ЛДИС) лежит, как видно из названия, эффект Доплера, проявляющийся в изменении частоты регистрируемых колебаний при движении излучателя или приемника. На практике обычно используется двукратный эффект Доплера, когда объект движется, а приемник и излучатель неподвижны. Одним из применяемых на практике методов ЛДИС является использование двух когерентных лучей, падающих на изучаемый объект под углом друг к другу [2].

Однако в случаях когда требуется измерение высокоскоростных объектов, доступ к которым по тем или иным причинам осложнен (например, в случае исследования детонационных процессов либо при изучении динамики пули во время выстрела из огнестрельного оружия), наиболее подходящим вариантом являются автоколлимационные схемы (гомодинные, либо гетеродинные), позволяющие производить измерения высоких скоростей (вплоть до нескольких километров в секунду) в сложно доступных местах (например, внутри канала ствола).

Большинство схем подобных измерителей скорости основывается на циркуляторах, позволяющих реализовывать интерферометрические схемы (аналоги интерферометра Маха – Цендера) с одним каналом, который используется как для облучения изучаемого объекта, так и для приема рассеянного от него излучения [3, 4].

В данных схемах используются неподвижные излучатели и приемники, которые соответственно облучают и принимают рассеянный свет от движущегося объекта (рис. 1). Излучение в системе отсчета объекта будет сдвинуто на частоту  $v/\lambda$ , что даст при переходе обратно в лабораторную систему отсчета частоту рассеянного излучения

$$f' = f + 2v/\lambda.$$

Внутри интерферометрических схем рассеянный свет смешивается с излучением с частотой  $f$  (разделенного перед подачей на объект), что после интерференции дает сигнал с биениями, получение которых можно описать следующей формулой:

$$\cos(2\pi ft) + \cos(2\pi f't) = 2\cos(2\pi \frac{f+f'}{2}t) \cdot \cos(2\pi \frac{f-f'}{2}t).$$

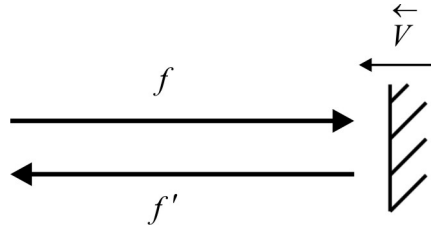


Рис. 1. Схематическая иллюстрация эффекта Доплера:  
 $f$  – излучаемая частота;  $f'$  – частота рассеянного света

Поскольку измеряемые скорости малы (относительно скорости света), то, воспользовавшись соотношением  $\frac{f + f'}{2} \approx f$ , можем записать:

$$2\cos\left(2\pi\frac{f - f'}{2}t\right) \cdot \cos(2\pi ft).$$

Отсюда видно, что совмещенный сигнал будет иметь периодические изменения амплитуды, которые и именуются биениями (при переходе к интенсивности частота биений удвоится и станет равна  $f - f'$ ). Данные биения измеряются приемно-оцифровывающими устройствами, которые регистрируют изменение интенсивности с частотой, соответственно равной:

$$\Delta f = f - f' = 2v / \lambda,$$

где  $v$  – скорость движения изучаемого объекта;  $\lambda$  – длина волны используемого излучения.

Для быстрого ориентирования можно построить таблицу для скоростей и частот при  $\lambda = 1,064$  мкм:

$\Delta f$	$v$
10 кГц	5,32 мм/с
100 кГц	5,32 см/с
1 МГц	0,532 м/с
100 МГц	53,2 м/с
1 ГГц	532 м/с

В данной работе применялась полностью оптоволоконная гомодинная схема автоколлимационного доплеровского измерителя скорости, являющегося аналогом интерферометра Майкельсона, без использования циркуляторов.

Произведены тестовые измерения с использованием пневматической винтовки ИЖ-61. Проанализированы полученные результаты, оценена разрешающая способность установки, а также исследованы дополнительные явления, сопровождающие выстрел винтовки и потенциально влияющие на его точность.

## 2. Схема эксперимента

Схема представляет собой волоконный аналог интерферометра Майкельсона. Принципиальная схема использованной установки показана на рис. 2.

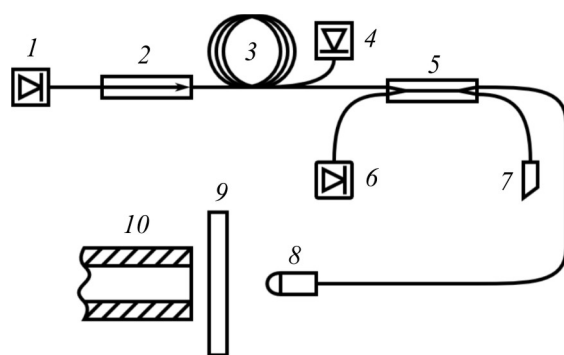


Рис. 2. Схема установки: 1 – источник лазерного излучения с длиной волны 1064 нм; 2 – изолятор; 3 – волоконный усилитель; 4 – диод накачки усилителя; 5 – ответвитель 1:1, выполняющий функцию полупрозрачного зеркала; 6 – устройство снятия данных (приемник, осциллограф и ПК); 7 – коннектор FC/APC, выполняющий функцию слабоотражающего зеркала; 8 – коллиматор GRIN с диаметром пучка порядка 1 мм; 9 – защитное оргстекло; 10 – дуло пневматической винтовки

Коннектор 7 с угловым сколом использован в качестве слабоотражающего зеркала в целях увеличения контрастности интерференционной картины, принимаемой устройством сбора данных 6. Необходимость в подобном зеркале возникает из-за из весьма малой доли излучения, возвращающегося обратно в волокно после рассеяния от цели и прохода через коллиматор 8. Согласно оценкам эта доля составляет около  $10^{-3}$  –  $10^{-4}$  от излученной мощности.

Коллиматор 8 с малым размером пучка выбран не только из соображений, связанных с измерением малодоступных объектов (например, каналов малокалиберных винтовок), но и для снижения влияния спекловых картин на результаты измерений, которые при увеличении

диаметра пучка приводят к уменьшению контрастности интерференционной картины.

Измерения скорости пули проводились с использованием пружинно-поршневой пневматической винтовки ИЖ-61 и свинцовых пуль весом 0,5 г. Данная винтовка работает на основе поршня, который взводится с помощью рычага в боевое положение, накапливая при этом потенциальную энергию в пружине, прикрепленной к данному поршню; в момент выстрела поршень освобождается спусковым механизмом, что приводит к его движению внутри стакана и, соответственно, к нагнетанию давления; за счет соединения с каналом ствола данное давление приводит к ускорению пули. Винтовка закреплялась на оптическом столе; защитное оргстекло 9 закреплялось под углом около  $60^\circ$  относительно ствола винтовки. В качестве пулеуловителя использовался поролон толщиной около 3 см, приставленный сбоку к оргстеклу. Фотографии установки представлены на рис. 3, 4.



Рис. 3. Фотография винтовки на стенде

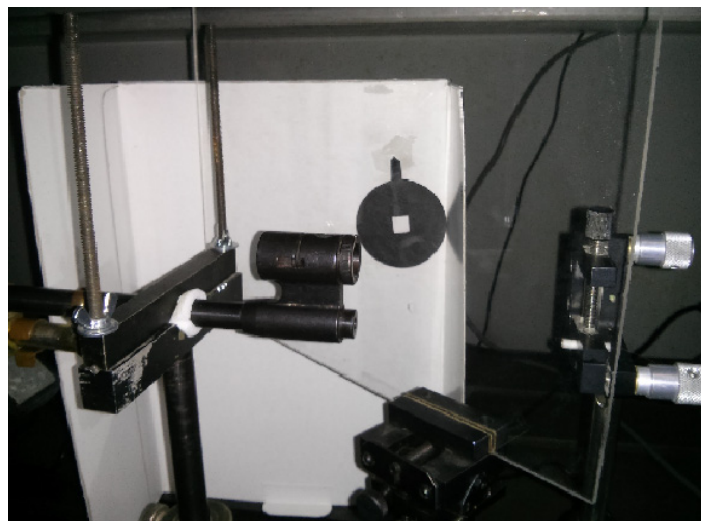


Рис. 4. Фотография коллиматора, защитного стекла и дула винтовки

Отраженное от защитного стекла излучение улавливалось картонным заграждением. Для уменьшения нежелательного отражения от поверхности картона в месте падения отраженного от стекла излучения был наклеен кусок матовой черной бумаги.

Источником лазерного излучения (поз. 1 на рис. 2) являлся полупроводниковый одночастотный лазер, стабилизированный с помощью брэгговской решетки, работавший на токе 120 мА, излучая около 20 мВт излучения с длиной волны 1064 нм. Для увеличения мощности использовался волоконный усилитель [5]. Применение усилителя в данной схеме не улучшает контрастность принимаемого сигнала, но увеличивает его амплитуду, что позволяет в некоторых случаях улучшать соотношение сигнал/шум. Оптимальный ток накачки варьируется и обычно лежит в пределах 1,3–1,5 А. Мощность излучения на выходе из коллиматора 8 составила 60 мВт.

В качестве детектора излучения использовался приемник ПРОМ-364М-34368 с волоконным входом. Сигнал с приемника поступал на цифровой осциллограф В-424, работающий в связке с персональным компьютером посредством USB-интерфейса. Осциллограф способен за одно измерение сохранять 16 776 704 отсчетов ( $2^{24} - 512$ ), что при максимальной частоте снятия данных (отсчет каждые 2 нс) дает продолжительность чуть менее 33,6 мс. Осциллограммы сохранялись в текстовом формате с помощью специализированного ПО «Осциллограф» от производителя данного осциллографа, после чего производилась их обработка, результаты которой будут представлены ниже.

Осциллограф был настроен на одиночный запуск по внешнему сигналу, синхронизированный с моментом нажатия на спусковой крючок.

### 3. Обработка данных

Результатом измерения является осциллограмма, т.е. последовательность из 16 776 704 пар значений (время и напряжение), каждое из которых эквидистантно отстоит от соседнего на величину времени  $dt$ . Из-за эффекта Доплера в данной осциллограмме будут наблюдаться биения с частотой, прямо пропорциональной скорости измеряемого объекта, поэтому необходимо вычислить спектральные компоненты осциллограммы в различные моменты времени.

Наиболее удобным форматом представления подобных результатов является спектрограмма, т.е. диаграмма, показывающая зависи-

мость спектральной плотности мощности сигнала от времени. Традиционно трехмерная спектрограмма представляется в виде двухмерного изображения, на котором спектральная плотность отображена в виде цвета либо интенсивности точек на данном изображении.

При вычислении спектрограммы используется быстрое преобразование Фурье (БПФ). В выбранный момент времени мы должны определить размер блока (количество отсчетов в окрестности выбранного момента), по которому будет вычисляться функция БПФ. Будем в дальнейшем обозначать размер этого блока через  $N$  (причем, поскольку используется БПФ,  $N$  должно равняться степени двойки).

Кроме того, использовалось перекрытие блоков на величину  $N/2$ , т.е. вторая половина блока выступала в качестве первой половины следующего блока.

Таким образом, получаем следующие характеристики спектрограммы: разрешение по частоте  $\delta f = 1/(dt \cdot N)$ , максимально измеряемую частоту  $f_{\max} = 1/(2 \cdot dt)$  и разрешение по времени  $\delta t = dt \cdot N/2$ .

Таким образом, видно, что разрешение по времени и по частоте взаимосвязаны, и с увеличением одного из них неизбежно будет уменьшаться второе. По этой причине необходимо выбирать размер блока  $N$  исходя из параметров изучаемого процесса.

Непосредственная обработка производилась с помощью языка программирования Python с использованием средств библиотек Matplotlib, SciPy и NumPy.

#### **4. Результаты эксперимента**

Характерная спектрограмма представлена на рис. 5 (полезный сигнал выделен линией). При увеличении частоты интенсивность полезного сигнала снижается, что, вероятно, объясняется ограниченным быстродействием использованного приемника.

Стоит отметить стробоскопический эффект «отражения» частоты, который позволяет измерить частоты, выходящие за пределы скорости запоминающего устройства осциллографа. Данный эффект возникает благодаря высокому быстродействию устройства выборки и хранения. При максимальной скорости оцифровки (2 нс на отсчет) сигнал не усредняется за все 2 нс, а берется «мгновенная» выборка (малая доля наносекунды) из этих 2 нс.

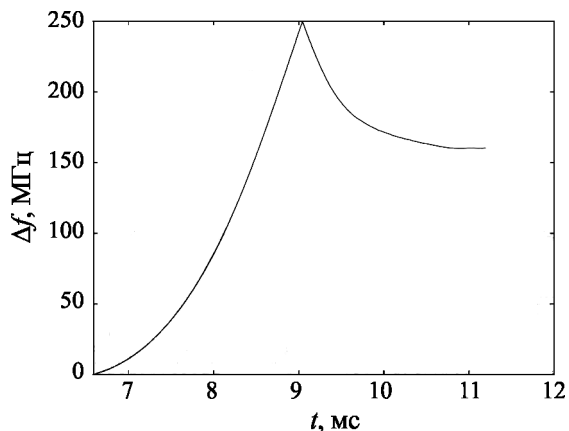


Рис. 5. Характерная спектрограмма выстрела

За нулевой момент времени принято начало движения поршня, которое на данном масштабе частот спектрограммы неразличимо, по этой причине спектрограмма представлена с начала движения пули. Видно, что продолжительность разгона пули составляет чуть менее 5 мс. Во время предшествующего этапа продолжительностью около 6,5 мс происходит начальное ускорение поршня, которое вызывает движение ствола (вместе с пулей) за счет отдачи (данный этап будет рассмотрен в следующем разделе). Таким образом, продолжительность выстрела от момента начала движения поршня до столкновения пули с защитным стеклом составляет около 11,2 мс.

Кроме того, можно заметить слабый сигнал, у которого скорость несколько превышает скорость пули; данное явление также будет представлено в следующем разделе.

Точность методики возможно оценивать различными методами. Теоретически, с опорой на осциллограмму (интерферограмму), возможно восстановление положения изучаемого объекта с точностью до  $1/4$  использованной длины волны излучения за счет подсчета биений с фиксацией времени (в этом случае метод корректнее рассматривать как дистанционное измерение расстояния до объекта интерферометрическим методом). Однако на практике удобнее работать со спектрограммой, что через выбор величины блока  $N$  накладывает ограничения на разрешающую способность по частоте и по времени, что и было показано в предыдущем разделе. Кроме того, на практике наблюдается уширение сигнала (либо по частоте,



либо по времени), вызванное усреднением скоростей в выбранный промежуток времени, которое возникает из-за ускорения измеряемого объекта. При размере блока  $N$  оптимальнее всего будет измеряться объект, двигающийся с ускорением  $a = \frac{\lambda}{(Ndt)^2}$ ; при большем ускорении будет наблюдаться уширение по частоте, при меньшем – уширение по времени.

Из вышесказанного следует, что при  $dt = 2$  нс оптимальный размер блока составил  $N = 2^{11}$ , что давало, с учетом уширения, ошибку определения скорости  $\pm 0,2$  м/с при разрешающей способности по времени 6 мкс.

После выделения полезного сигнала можно получить график зависимости скорости и ускорения (определенного методом численного дифференцирования) от времени, представленный на рис. 6.

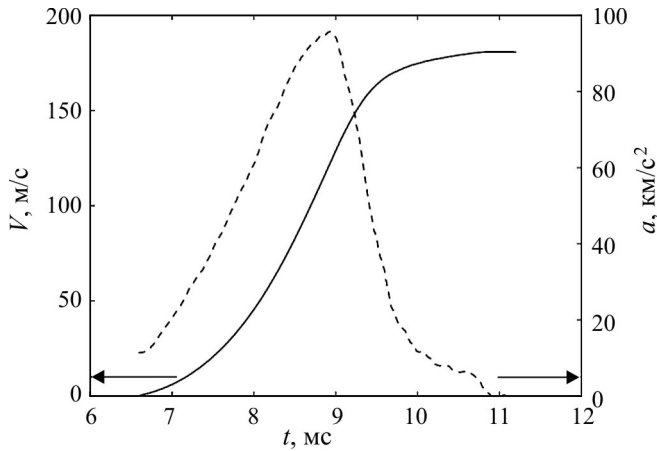


Рис. 6. График зависимости скорости (сплошная линия) и ускорения (пунктир) пули от времени

Воспользовавшись численным интегрированием (методом Симпсона), возможно построить график зависимости ускорения и скорости пули от расстояния, пройденного пулей в канале ствола (рис. 7).

Общее расстояние, пройденное пулей, полученное интегрированием, составило 48 см, что с хорошей точностью согласуется с длиной ствола (45 см) и расстоянием до защитного стекла (примерно 3 см).

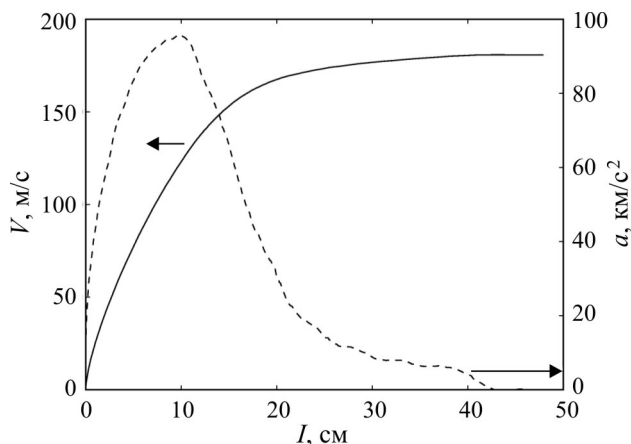


Рис. 7. График зависимости скорости (сплошная линия) и ускорения (пунктир) пули от расстояния

### 5. Дополнительные явления

Кроме непосредственного полета пули также были измерены дополнительные явления, происходящие в самом начале выстрела. Первым и наиболее явным является «горб», предшествующий основному ускорению пули. Максимальная скорость данного горба составляет примерно 32 см/с, продолжительность – чуть более 6 мс.

Наиболее убедительное объяснение данного явления – отдача винтовки, связанная с работой поршня. Винтовка, двигаясь как целое, увлекает за собой пулю, т.е. представленный горб отображает движение назад, после чего сама пуля начинает ускоряться за счет давления газов, что и приводит к резкому спаданию горба и переходу к картине ускорения, рассмотренной в предыдущем разделе.

Для дополнительной проверки данного объяснения были проведены эксперименты со снятием данных при холостом выстреле, а также с торца ствола с заряженной пулей.

Результаты обработанных спектрограмм, совмещенные с результатом обычного измерения пули, представлены на рис. 8. Учтено, что из-за отдачи поршня движение в действительности происходит в обратном направлении (на спектрограмме в случае использованной схемы виден только модуль скорости). Видно, что при холостом выстреле скорость ствола выше, чем при заряженном выстреле, что можно объяснить более высокой отдачей, вызванной движением поршня, так как отсутствует пуля, препятствующая свободному выходу газов.

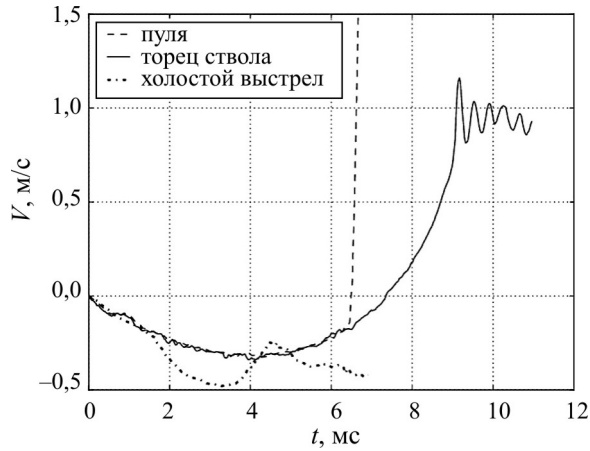


Рис. 8. Совмещенные графики различных замеров

При  $\delta t = 2$  нс оптимальный размер блока составил  $N = 2^{14}$ , что давало, с учетом уширения, ошибку определения скорости  $\pm 5$  см/с при разрешающей способности по времени примерно 50 мкс.

Если сравнивать измерение скорости торца ствола с измерением скорости непосредственно пули, то можно заметить, что графики достаточно схожи, вплоть до примерно 6,5 мс, т.е. до момента когда давление в канале ствола становится достаточным для преодоления силы трения пули о ствол и начала ее ускорения. Кроме того, в момент с 9 по 12 мс хорошо видны колебания ствола, которые, предположительно, вызваны ударом поршня о дно стакана.

Другим явлением, которое удалось замерить, выступает, предположительно, вылет капель масла, уносимых потоком воздуха перед пулей. График данного явления представлен на рис. 9 (слабый сигнал этого же явления можно было видеть на рис. 5). Правее располагается сигнал от пули во время основного ускорения, снизу – «горб» отдачи поршня (на данном графике, в отличие от предыдущих, представлен модуль скорости), который был подробно рассмотрен ранее. В отличие от сигнала, соответствующего пуле (сплошная линия), сигнал от капель масла заметно уширен. Данный факт на графике выражен в виде двух пунктирных линий, обозначающих диапазон скоростей капель масла в некоторый момент времени.

Таким образом, показано, что установка позволяет производить одновременное измерение различных явлений, тем самым давая возможность получить дополнительную информацию об изучаемом процессе.

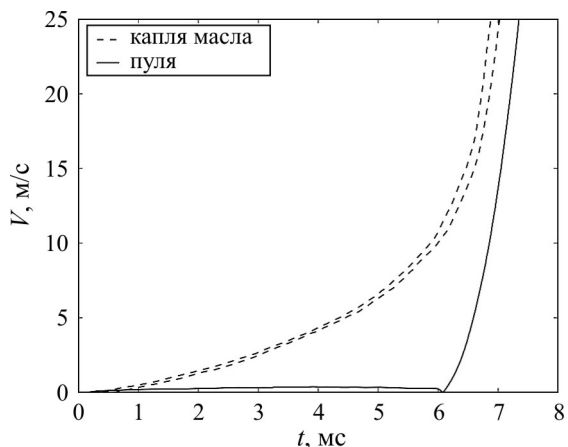


Рис. 9. График модуля скорости капля масла (диапазон между пунктирными линиями) и пули (сплошная линия)

## 6. Заключение

Успешно собрана и протестирована установка автоколлимационного доплеровского измерения скорости на основе интерферометра Майкельсона в полностью оптоволоконной реализации. Выбранная схема отличается простотой и невысокой стоимостью использованных компонентов.

Проведено измерение скорости пули при выстреле из пневматической винтовки ИЖ-61. Проанализированы полученные спектрограммы, вычислена оценки точности выполненных измерений. При измерении высоких скоростей (от 1 до 180 м/с) точность определения скорости была не менее  $\pm 0,2$  м/с при временном разрешении 6 мкс; в случае измерения малых скоростей (до 1 м/с) точность определения скорости была не менее 5 см/с при временном разрешении 50 мкс.

Кроме непосредственного измерения зависимости скорости пули в канале ствола от времени выделены и измерены дополнительные явления, такие как: движение корпуса винтовки в начальные моменты выстрела при обычном и холостом выстрелах, колебания ствола винтовки в моменты, предшествующие вылету пули, скорость каплей масла, опережающих пулю. Показана применимость выбранной схемы для задач дистанционного измерения скорости малых объектов в труднодоступных местах.

## Список литературы

1. Аникин А., Федосейский А. Лазерные доплеровские измерители в системе учёта горячего проката // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 24–28.

2. Хурхесова А.В., Фёдоров Е.М. Лазерный доплеровский измеритель скорости и длины // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы III науч.-практ. конф., Томск, 3–5 мая 2012 г. / под ред. А.В. Юрченко. – Томск: Изд-во Нац. исслед. Том. политехн. ун-та, 2012. – С. 196–201.

3. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques / O.T. Strand, D.R. Goosman, C. Martinez, T.L. Whitworth, W.W. Kuhlow // Review of Scientific Instruments. – 2006. – Vol. 77(8). – P. 083108–083108-8. DOI: 10.1063/1.2336749.

4. Levinson S., Russell R., Bless S. Photonic Doppler Pressure Gauge (PDPG). – URL: [http://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/52707/PDV\\_2010\\_Levinson\\_PhotonicDopplerPressureGauge.pdf?sequence=1](http://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/52707/PDV_2010_Levinson_PhotonicDopplerPressureGauge.pdf?sequence=1).

5. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б. Одночастотный гибридный лазер с выходной мощностью до 3 Вт на длине волны 1064 нм // Квантовая электроника. – 2012. – № 42(5). – С. 417–419.

## References

1. Anikin A., Fedoseiskii A. Lazernye doplerovskie izmeriteli v sisteme ucheta goriachego prokata [Laser Doppler measures in the accounting system hot rolled]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*, 2007, no. 1, pp. 24-28.

2. Khurkhesova A.V., Fedorov E.M. Lazernyi doplerovskii izmeritel' skorosti i dliny [Laser doppler measuring instrument of velocity and length]. *Materialy III nauchno-prakticheskoi konferentsii "Informatsionno-izmeritel'naia tekhnika i tekhnologii"*. Ed. A.V. Urchenko. Tomsk: Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet, 2012, pp. 196-201.

3. Strand O.T., Goosman D.R., Martinez C., Whitworth T.L., Kuhlow W.W. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques. *Review of Scientific Instruments*, 2006, vol. 77(8), pp. 083108-083108-8. DOI: 10.1063/1.2336749.

4. Levinson S., Russell R., Bless S. Photonic Doppler Pressure Gauge (PDPG), available at: [http://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/52707/PDV\\_2010\\_Levinson\\_PhotonicDopplerPressureGauge.pdf?sequence=1](http://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/52707/PDV_2010_Levinson_PhotonicDopplerPressureGauge.pdf?sequence=1).

5. Trikshev A.I., Kurkov A.S., Tsvetkov V.B. Odnocastotnyi gibridnyi lazer s vykhodnoi moshchnost'iu do 3 Vt na dlina volny 1064 nm [Single-frequency hybrid laser with output power up to 3 Watts at a wavelength of 1064 nm]. *Kvantovaya elektronika*, 2012, no. 42(5), pp. 417-419.

Получено 25.11.2014