

А. М. Оборин¹✉, К. С. Зубанов¹, С. В. Двойнишников¹

Разработка программного обеспечения лазерного доплеровского анемометра без смещения частоты

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.oborin@g.nsu.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке программного обеспечения (ПО) для лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) без смещения частоты, предназначенного для бесконтактных измерений скорости частиц в газожидкостных потоках. Актуальность исследования обусловлена необходимостью высокоточного метрологического обеспечения экспериментов в области теплофизики, гидро- и аэродинамики без возмущения исследуемых процессов. Целью работы является создание кроссплатформенного ПО, обеспечивающего непрерывный сбор, обработку и анализ данных в режиме реального времени. Особенностью ЛДИС является использование адаптированной оптической схемы без квадратурной демодуляции и смещения частоты. Обработка сигнала включает частотную фильтрацию, спектральный анализ для определения доплеровской частоты и расчет скорости. Разработанное ПО позволяет проводить высокоточные измерения в научных и технических приложениях, обеспечивая удобный интерфейс для анализа данных в реальном времени.

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, ЛДИС без смещения частоты, измерение скорости частиц, газожидкостные потоки, программное обеспечение, Avalonia

A. M. Oborin¹✉, K. S. Zubanov¹, S. V. Dvoinishnikov¹

Development of a laser doppler anemometer software without frequency shift

¹ Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.oborin@g.nsu.ru

Abstract. The work is devoted to the development of software for a laser Doppler velocity meter (LDIS) without frequency offset, designed for non-contact measurements of particle velocity in gas-liquid streams. The relevance of the study is due to the need for high-precision metrological support for experiments in the field of thermophysics, hydro and aerodynamics without disturbing the processes under study. The aim of the work is to create cross-platform software that provides continuous data collection, processing and analysis in real time. A special feature of LDIS is the use of an adapted optical circuit without quadrature demodulation and frequency offset. Signal processing includes frequency filtering, spectral analysis to determine the Doppler frequency, and velocity calculation. The developed software allows for high-precision measurements in scientific and technical applications, providing a user-friendly interface for real-time data analysis.

Keywords: laser Doppler anemometer, LDIS without frequency shift, particle velocity measurement, gas-liquid flows, software, Avalonia

Введение

Развитие современной науки и технологий требует создания высокоточных и надежных методов измерения параметров газожидкостных потоков. Одной из

важнейших задач в области теплофизики, гидро- и аэродинамики является измерение скорости частиц в потоке с высокой чувствительностью и точностью.

Современные методы измерения скорости потоков включают контактные и бесконтактные технологии. Контактные методы обладают рядом ограничений, включая внесение возмущений в поток и ограниченную точность при высоких скоростях. В свою очередь, бесконтактные методы, основанные на лазерной и оптической технике, обеспечивают высокую пространственную и временную разрешающую способность, что делает их предпочтительными для точных измерений в сложных потоковых средах.

Одним из эффективных инструментов для измерения скорости частиц в газожидкостных потоках является лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС) [1,2]. Этот метод основан на регистрации доплеровского сдвига частоты лазерного излучения, рассеянного на движущихся частицах. ЛДИС обеспечивает высокую точность и чувствительность, не внося возмущений в исследуемый процесс.

Современный ЛДИС состоит из оптоэлектронного модуля, системы сбора данных и персонального компьютера с программным обеспечением. Особенность ЛДИС в данной работе заключается в использовании адаптированной оптической схемы, которая обеспечивает измерение скорости потока без смещения частоты оптического излучения и не использует квадратурную демодуляцию сигнала фотоприемника.

Целью работы является разработка программного обеспечения для ЛДИС, обеспечивающего непрерывный сбор, обработку и визуализацию данных о скорости частиц в газожидкостных потоках. Для этого решались задачи проектирования архитектуры системы, реализации алгоритмов обработки сигналов, интеграции с аппаратными модулями, разработки пользовательского интерфейса и тестирования на реальных экспериментальных установках.

Структура измерительного комплекса

Доплеровский метод, лежащий в основе лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС), использует явление смещения частоты лазерного излучения, рассеиваемого движущимся объектом. В отличие от классического эффекта Доплера, применяемого для измерения скорости крупных объектов, здесь метод ориентирован на определение скорости отдельных частиц в потоке посредством формирования интерференционной картины.

Отличительной характеристикой рассматриваемой оптической схемы (рис. 1) является использование стеклянного куба, состоящего из двух частей, разделенных специальным оптическим покрытием. Это покрытие выполняет функцию полупрозрачного зеркала, обеспечивающего разделение падающего лазерного излучения на два когерентных луча, что является ключевым условием для формирования стабильной интерференционной картины.

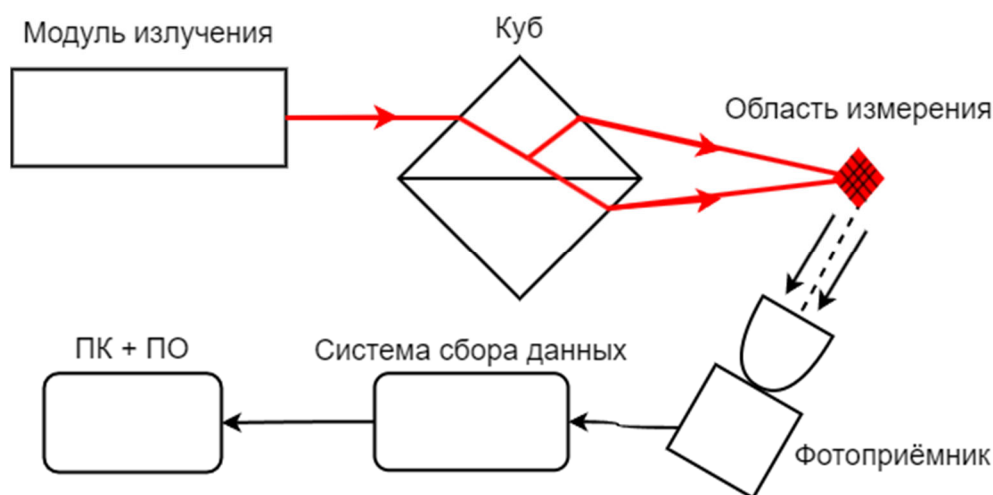


Рис. 1. Функциональная оптическая схема

В модуле излучения формируется лазерный луч, площадь сечения которого уменьшается с пройденным расстоянием вплоть до области перетяжки.

После прохождения стеклянного куба лазерный луч разделяется на два когерентных луча, распространяющихся по различным оптическим траекториям, после чего они встречаются в области перетяжки, образуя устойчивую интерференционную структуру. В этом участке их волновые фронты принимают плоскую форму, что обеспечивает создание высококонтрастной интерференционной картины, необходимой для дальнейшего анализа параметров оптического сигнала.

Фотоприемник направлен в сторону области перетяжки, регистрируя прохождение частицы через интерференционную картину. Он формирует сигнал, который передается в систему сбора данных для дальнейшей его обработки.

Разработанная измерительная система (рис. 2) состоит из оптоэлектронного модуля, системы сбора данных и персонального компьютера (ПК) с программным обеспечением на нем. Взаимодействие между первыми двумя происходит через коаксиальный кабель, взаимодействие с ПК – через USB.

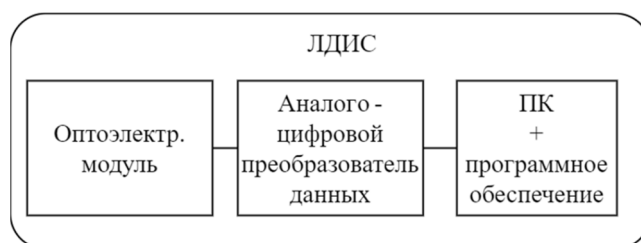


Рис. 2. Структура измерительного комплекса

В качестве системы сбора данных используется USB осциллограф LOTO OSC2002. Полоса пропускания составляет 50 МГц, разрядность – 8 бит, количество используемых каналов равняется одному.

Система сбора данных передает в ПК данные в виде фрагментированных пакетов. Формат пакетов реализован таким образом, что в одном пакете может передаваться один или несколько доплеровских сигналов. В зависимости от параметров USB осциллографа в один пакет можно вместить до 32 Кбайт данных. При этом скорость их передачи может достигать 3 Мбайт/с.

Реализованный модуль взаимодействия с системой сбора данных поддерживает протокол связи с USB осциллографом, отвечает за настройку режимов его работы, получает данные, приходящие от осциллографа, и складывает их в буфер для дальнейшей обработки. Также в USB осциллографе предусмотрен режим работы по триггеру, при котором передаваться будут только сигналы выше порогового значения.

Пользовательский интерфейс реализован на платформе .NET с использованием кроссплатформенного фреймворка Avalonia, что обеспечивает гибкость при дальнейшей адаптации системы. На текущем этапе разработка велась для платформы Windows, однако архитектурные решения и выбор технологий позволяют в будущем обеспечить поддержку Linux без значительных изменений в кодовой базе.

Внутренняя архитектура

Внутренняя архитектура отличается гибкостью и расширяемостью, позволяя модулям быть заменяемыми (рис. 3). Это актуально, так как вся система создается и отлаживается параллельно, любая компонента может измениться. Для обеспечения гибкости и расширяемости внутренней архитектуры необходимо создать «скелет» приложения, разделяющий программный модуль ЛДИС на минимально зависимые блоки. Каждый блок программы необходимо выполнять в отдельном потоке, для обеспечения максимальной производительности приложения.

Для обеспечения максимальной производительности диспетчер программы в непрерывном режиме получает и обрабатывает данные в двух разных потоках.

Реализованный алгоритм обработки входного сигнала разбит на несколько этапов. Каждый этап является абстрактным классом и может реализовывать различные алгоритмы.

Первоначально производится выделение пьедестала исходного сигнала с помощью фильтра низких частот, ширина окна которого зависит от параметров осциллографа. На следующем этапе происходит фильтрация низкочастотной составляющей, оставляя только доплеровский сигнал. Из доплеровского сигнала можно получить спектрограмму с помощью быстрого преобразования Фурье. С помощью спектрального анализа и метода подавления остаточной низкочастотной составляющей выделяем доплеровскую частоту в сигнале. Последним этапом является вычисление измеренной скорости по доплеровской частоте и известным параметрам осциллографа.

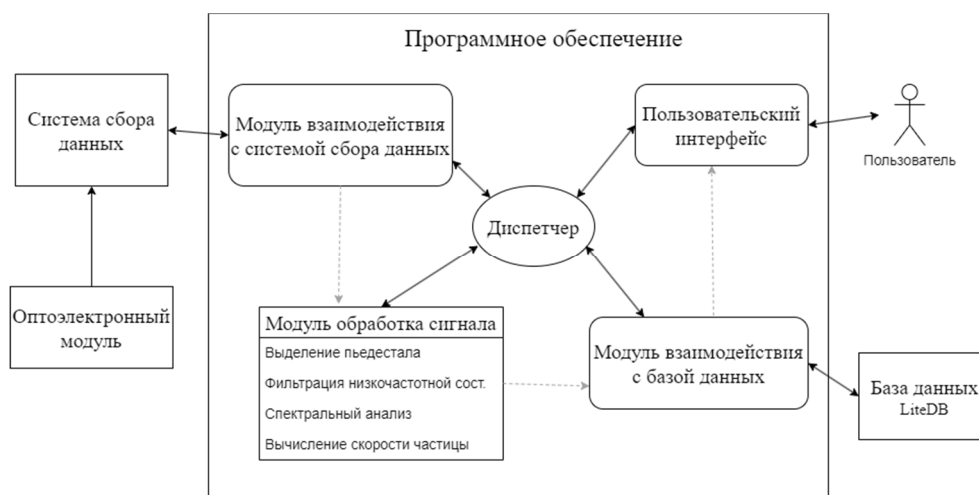


Рис. 3. Внутренняя архитектура программного модуля

Модуль базы экспериментов сохраняет результаты обработки полезного сигнала в базу данных для дальнейшего анализа. Быстрая запись результатов измерения ЛДИС реализована с помощью встроенной нереляционной базы данных LiteDB.

Тестирование

В ходе исследования выполнена калибровка лазерного доплеровского измерителя скорости с применением калибровочной платформы КЛАД-1 (рис. 4). Данная установка обеспечивает движение калибровочного объекта в диапазоне скоростей от 3 м/с до 24 м/с с погрешностью задания эталонной скорости не более 0,01%, что позволяет проводить высокоточную верификацию измерительной системы. Калибровка системы показала погрешность измерения скорости 0,21%, что соответствует требованиям к точности для подобных измерительных систем.

Для проверки корректности работы реализованных алгоритмов и функционала программного модуля ЛДИС без смещения частоты выполнено измерение скорости воздушного потока на выходе из сопла Витошинского (рис. 5). Для повышения уровня сигнала на фотоприемнике ЛДИС использовались светорассеивающие частицы аэрозоля глицерина. Компрессор создает воздушный поток, который проходит через генератор частиц аэрозоля глицерина, проходит через сопло Витошинского для стабилизации скорости и направления полета частиц после выхода из сопла.

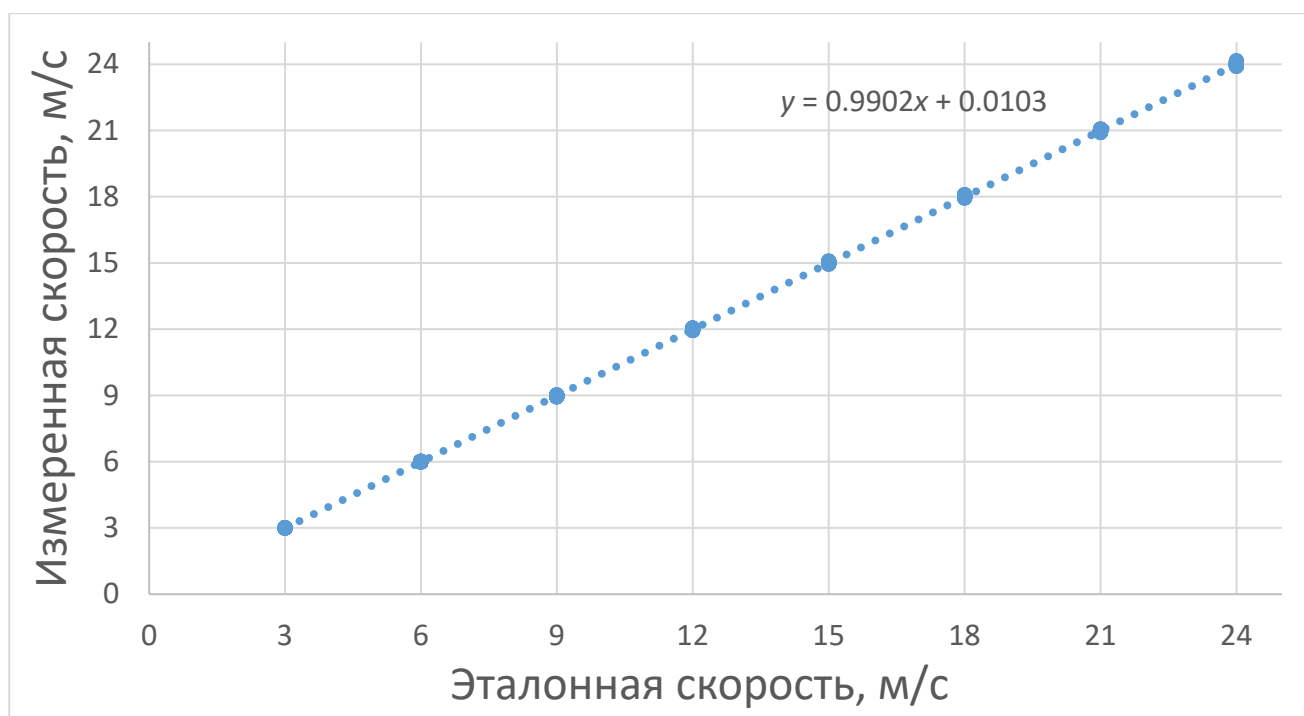


Рис. 4. Результаты калибровки ЛДИС

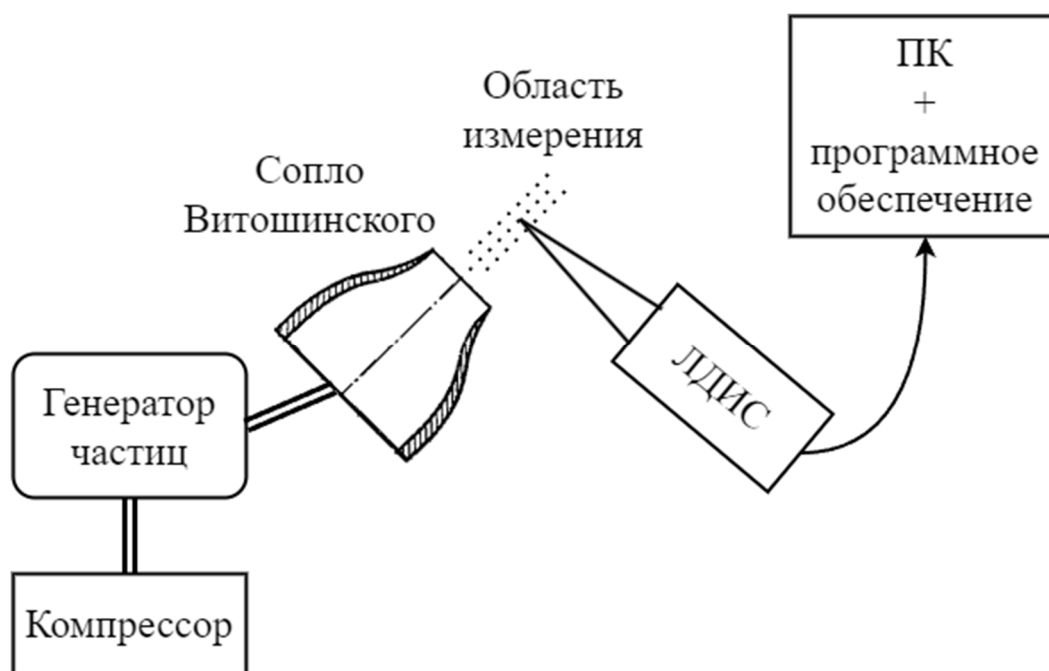


Рис. 5. Экспериментальный стенд

В ходе проведенных измерений установлено, что система демонстрирует стабильную работу при скоростях потока свыше 30 м/с. В результате измерена средняя скорость частиц в потоке, она составила 33,7 м/с (рис. 6).

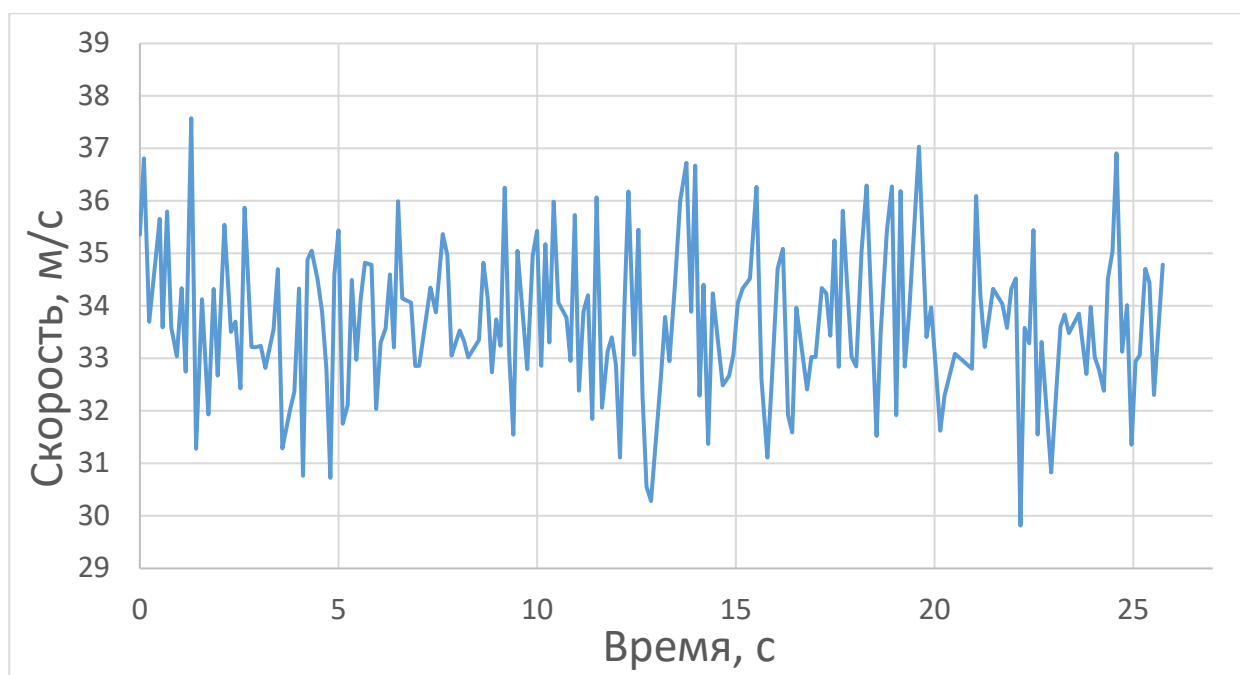


Рис. 6. Распределение скорости потока воздуха

Заключение

В ходе работы разработано программное обеспечение (ПО) для лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) без смещения частоты, обеспечивающее высокоточные измерения скорости частиц в газожидкостных потоках в режиме реального времени. Ключевой особенностью системы стало использование адаптированной оптической схемы, исключающей необходимость квадратурной демодуляции и смещения частоты лазерного излучения, что упростило аппаратную реализацию и повысило надежность измерений.

Реализованное ПО обеспечивает непрерывный сбор данных, их обработку с применением спектрального анализа для определения доплеровской частоты, а также сохранение результатов в базе данных. Алгоритмы обработки сигналов оптимизированы для работы в режиме реального времени, что подтверждено тестами на калибровочной платформе с погрешностью измерений 0,21%. Успешная демонстрация функционала выполнена при измерении скорости воздушного потока из сопла Витошинского, где среднее значение составило 33,7 м/с.

На текущем этапе разработка велась для платформы Windows, однако архитектурные решения и выбор технологий позволяют в будущем обеспечить поддержку Linux без значительных изменений в кодовой базе. Пользовательский интерфейс, разработанный с учетом современных требований, предоставляет инструменты для визуализации данных и экспорта результатов, что делает систему применимой в научных и промышленных исследованиях.

Разработанное ПО может быть использовано для диагностики потоков в энергетике, авиастроении и химической промышленности, где критически важны бесконтактные измерения с минимальным уровнем погрешности.

Перспективы развития системы связаны с расширением кроссплатформенной поддержки, оптимизацией алгоритмов, а также интеграцией с облачными сервисами для удаленного мониторинга.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меледин В.Г., Наумов И.В., Аникин Ю.А., Садбаков О.Ю. и др. Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС, 3-я компонента) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-056 ЛМЗ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации / Р5 134 00 00 00 . - Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО РАН, 2004.- 51 с.
2. Лазерные доплеровские измерители скорости / Ю.Г.Василенко, Ю.Н. Дубнищев, В.П. Коронкевич и др.; Отв. ред. Ю.Е. Нестерихин. - Новосибирск: Наука, 1975. – 164 с.

© А. М. Оборин, К. С. Зубанов, С. В. Двойнишников, 2025