

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИС-
СЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Калинин Владислав Алексеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Влияние напряжения на ФЭУ на характеристики
регистрируемого сигнала в лазерной доплеровской
анемометрии**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19313

Научный руководитель:

к.т.н. И. К. Кабардин

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к. ф.-м. н. Д. С. Чуркин

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Работа посвящена знакомству с методом лазерной доплеровской анемометрии, реализованному в устройстве «лазерный доплеровский измеритель ЛАД - 06», и исследованию влияния различных параметров на свойства и характеристики измеряемого сигнала. В частности, было исследовано влияние напряжения фотоэлектронного умножителя на характеристики измеряемого сигнала. Получены экспериментальные данные, по которым выявлена зависимость регистрации параметров частиц при различных значениях напряжения. Замечен рост регистрируемых параметров в области высокого напряжения 1540 В - 2240 В и нулевую фиксацию в области малых напряжений 0 В – 600 В. Была выявлена эффективная область напряжения, составляющая 1040 В – 1440 В, для точных регистраций данных. Кроме непосредственного измерения зависимости регистрации параметров частиц от напряжения измерена длина измерительной зоны прибора, которая составила 800 мкм, что согласуется с теорией и характеристиками устройства.

Оглавление

1 Введение	4
2 Теоретическая часть.....	4
2.1 Доплеровский метод измерения скоростей.....	4
2.2 Метод лазерной доплеровской анемометрии.....	5
2.3 Фотоэлектронный умножитель.....	6
3 Экспериментальная часть.....	9
3.1 Описание установки.....	9
3.2 Методика проведения экспериментов	10
3 Экспериментальная часть.....	11
5 Вывод.....	13
6 Список литературы.....	14

1. Введение

В настоящее время метод лазерной доплеровской анемометрией является востребованным и широко используется в различных областях науки и техники для исследований самых различных потоков, от микроциркуляции крови в капиллярах человека до гиперзвуковых газовых потоков в реактивных двигателях. Данный метод реализован в лазерном доплеровском анемометре с адаптивной временной селекцией ЛАД-06. «Измерительный комплекс ЛАД-06» разработан и собран в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Устройство, выполнено на основе современных достижений лазерной оптики и электроники, обеспечивает необходимый уровень чувствительности и воспроизводимости показаний [1]. Функция регистрации сигнала является одно из самых важных в работе прибора. Обычно ее выполняет фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), параметры которого сильно зависят от подаваемого напряжения. Прибор обладает большой чувствительностью и хорошим быстродействием. Именно поэтому он является неотъемлемой частью лазерных доплеровских анемометров.

Целью работы было исследование зависимости чувствительности оптического датчика на основе ФЭУ от подаваемого на него напряжения в лазерном доплеровском измерителе ЛАД-06.

Решалось две задачи:

1. Определение оптимального параметра работы фотоэлектронного умножителя, более конкретно – измерение диапазона напряжений, при котором достигается оптимальная чувствительность и линейность характеристик прибора
2. Определение характеристик измерительной зоны.

2. Теоретическая часть

2.1 Доплеровский метод измерения скоростей

Эффект Доплера – это изменение частоты колебаний или длины волны, воспринимаемой наблюдателем при движении источника колебаний, и наблюдателя друг относительно друга. Важнейшим практическим применением эффекта Доплера является измерение скорости различных движущихся объектов путем регистрации изменений частоты рассеянного ими излучения. С появлением источников когерентного излучения в оптическом диапазоне появился класс приборов, называемых лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС) или лазерные доплеровские анемометры (ЛДА).

Доплеровский метод измерения скоростей основан на измерении частоты лазерного излучения, рассеянного движущимся объектом. Лазерный пучок, характеризуемый частотой ω_0 и волновым вектором $k_0 = \omega_0 / c$, где c - скорость света, падает на движущийся со скоростью v объект и рассеивается в разные стороны. Рассеянная волна при этом характеризуется волновым вектором k_s и частотой ω_s . Взаимосвязь между оптическими частотами ω_0 и ω_s определяется выражением:

$$\omega_s = \frac{\omega_0 (1 - \left(\frac{v}{c}\right) \cos\theta)}{(1 - \left(\frac{v}{c}\right) \cos\vartheta)}$$

где θ - угол между направлением распространения лазерного пучка и направлением движения объекта, ϑ - угол между направлениями регистрации волны и движения объекта. Это соотношение позволяет определить скорость объекта по измеренной частоте рассеянной волны. С учетом этой формулы можно определить обусловленный эффектом Доплера сдвиг частоты рассеянного излучения, как $\omega_D = \omega_s - \omega_0$. Сдвиг частоты не зависит от направления наблюдения рассеянного излучения и линейно зависит от величины скорости. Это значит, что результат измерения доплеровского сдвига частоты определяется геометрией освещающих пучков.

2.2 Метод лазерной доплеровской анемометрии

Для измерения частот применяют лазерные доплеровские измерительные системы. Благодаря им можно легко вычислить вектор скорости частиц в газожидкостных многофазных мутных потоках. В лазерных измерителях часто используется дифференциальная схема с двумя зондирующими пучками. На движущийся объект направляются два лазерных пучка. Пересекаясь в потоке, лазерные пучки образуют интерференционную картину. Область пересечения называется зоной перетяжки. Расстояние области прямо пропорционально длине волны лазера и ее размер, как правило, составляет миллиметр. Рассеянное в произвольном направлении оптическое излучение регистрируется фотоприемником. Такие оптические излучения называются вспышками. Тогда общий доплеровский сдвиг частоты будет подсчитан как: $\omega_D = v(k_1 - k_2)$, где k_1 и k_2 это волновые векторы первого и второго пучков. Прибор позволяет измерить две проекции вектора скорости в диапазоне 0.0001 м/с - 200 м/с с относительной погрешностью, не превышающей 0.1 % [1].

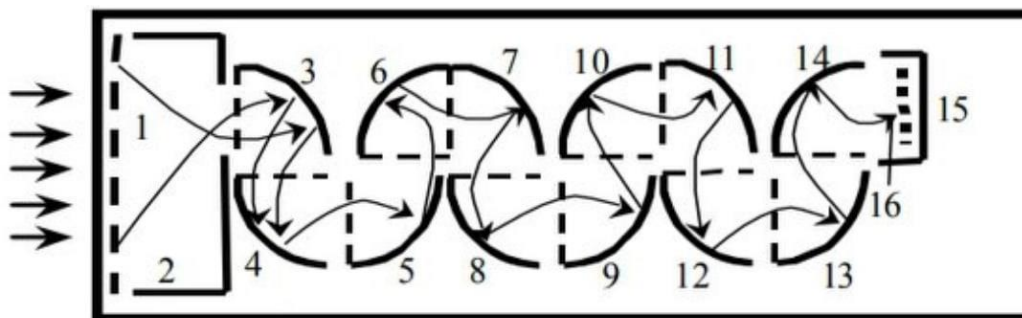
2.3 Фотоэлектронный умножитель

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – это фотоэлемент с многократным усилением, основанным на явлении вторичной эмиссии. Фотоумножитель состоит из фотокатода, фокусирующего устройства, нескольких эмиттеров (динодов) и анода. Фотокатоды обладают весьма высокой чувствительностью, составляющей 50 мкА/лм. Такая чувствительность соответствует тому, что на каждые 100 световых квантов, попадающих на фотокатод, из него вырывается в среднем около 10 электронов. Постоянная времени – порядка $10^8 - 10^{10}$ с, то есть допускаются весьма высокие частоты модуляции. Благодаря таким свойствам этот прибор встроен в лазерные доплеровские измерительные системы и является важнейшей их частью.

Все преимущества устройства компенсируют неудобства, связанные с необходимостью использования высоковольтных блоков питания и важностью зависимости напряжения на проведения различных экспериментов. Чаще всего питание

осуществляется от источника высокого напряжения до 2000 В через резисторный делитель.

В ФЭУ электроны ускоряются и фокусируются с помощью электростатического поля. Световые кванты, падающие на фотокатод, вызывают фотоэффект. Возникшие при этом фотоэлектроны попадают в электрическое поле, ускоряются и фокусируются на первом эмиттере. При ударах электронов о первый эмиттер происходит вторичная эмиссия. В этом процессе, называемом вторично-электронной эмиссией, должна образоваться группа из 3-5 и более электронов на каждый упавший, иначе работа диодной системы будет малоэффективной. Электроны, выбитые из первого эмиттера, имеют малый запас энергии, но они ускоряются благодаря межэлектродному полю на промежутке и, попадая на второй эмиттер, вызывают в свою очередь вторичную эмиссию со второго. Таким образом, число электронов от эмиттера к эмиттеру лавинообразно нарастает.



Электроны с последнего эмиттера собираются на аноде фотоумножителя. В этом заключается процесс генерации полезного сигнала на выходе умножителя [2].

Рис 1. Устройство ФЭУ. 1 фотокатод, 2 катодная камера
3-14 диодная система, 15-16 анодные узлы

Коэффициенты вторичной эмиссии и усиления ФЭУ сильно зависят от напряжения питания. С увеличением напряжения на делителе коэффициент эмиссии быстро возрастает и наоборот. Эта зависимость может быть представлена выражением: $\sigma = A U e^{U/U_0}$, где U – ускоряющее напряжение, приложенное между соседними диодами, A и U_0 – это постоянные, определяемые свойствами материала поверхности эмиттеров. Каждый первичный фотоэлектрон инициирует весь процесс умножения и, независимо от остальных, дает на выходе

результатирующую группу, среднее число электронов в которой K , где K – это коэффициент усиления. Он имеет вид зависимости от напряжения:

$$K = qA^n U^n e^{-nU/U_0}$$

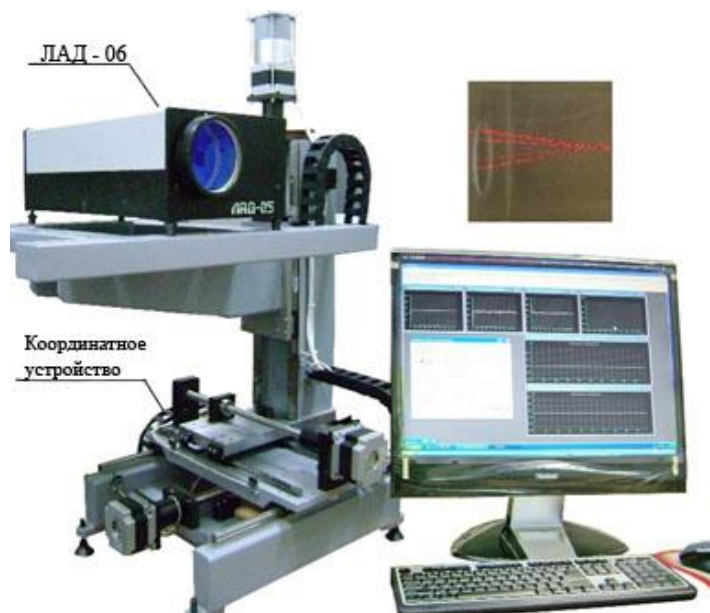
где q – множитель, меньший единицы, учитывающий неполное собирание электронов с фотокатода на первый эмиттер; n – число эмиттеров. Такая зависимость коэффициентов от напряжения обуславливается необходимостью достаточно хорошей регулировки этих показателей при проведении экспериментов. Поскольку коэффициент вторичной эмиссии не зависит от числа падающих электронов, то ФЭУ представляет собой линейный прибор, то есть заряд, приносимый лавиной на анод, пропорционален числу первичных электронов, собираемых с катода, и, следовательно, пропорционален интенсивности световой вспышки, попавшей на катод [3]. Однако при высоком напряжении питания наблюдается дефокусировка, то есть нарушается линейность. Появляются шумы, интенсивность которых резко возрастает при дальнейшем повышении напряжения. Шумовые сигналы по величине могут превышать полезные, это приводит к регистрации ложных данных на приборе. Источниками этих шумов являются автоэлектронная эмиссия и явление ионной обратной связи [4]. При предельно высоких значениях напряжения и большом коэффициенте усиления процесс роста шумов становится неуправляемым и возникает само - поддерживающийся заряд. В этой ситуации возможно необратимое разрушение анода и последних динодов. В нашем приборе стоит ограничитель, который не позволит нам достичь таких величин. Все эти процессы, создающие шумовой сигнал, называются темновой ток [5]. Они ведут к росту погрешностей регистрации измерений вектора скорости. При малых параметрах напряжения не хватает энергии для частиц, и медленные вторичные электроны могут создать объемный заряд у поверхности эмитирующего динода, достаточный для того, чтобы часть электронов вернулась обратно на динод. Это сильно ограничивает обнаружительную способность системы, то есть диапазон измеряемых сигналов предельно маленький. При таких значениях

напряжения анемометр может регистрировать малые параметры частиц или нулевые.

3. Экспериментальная часть

3.1 Описание установки

Установка состоит из лазерной доплеровской измерительной системы ЛАД-06 на координатно-перемещающемся устройстве (рис 2) и компьютера, благодаря которому происходил сбор информации. Отличительной особенностью ЛАД-06 является повышенное отношение сигнала к шуму за счет использования полной мощности лазерного излучения в каждом измерительном канале. Это свойство



снижает погрешности, создаваемые шумом на высоких напряжениях. Установка работает в режиме порогового детектирования.

Рис 2. ЛАД-06 на координатно-перемещающемся устройстве

Также собрана система (рис 3), состоящая из цилиндрического сопла диаметром 15 см и длиной 17 см, вентилятора и паровой установки AIR-O-SWISS фирмы Вонесо. С помощью нее происходила подача частиц для регистрации анемометром. Для определения длины измерительной зоны был применен вращающийся диск с отмеченными точками, эмитирующими частицу

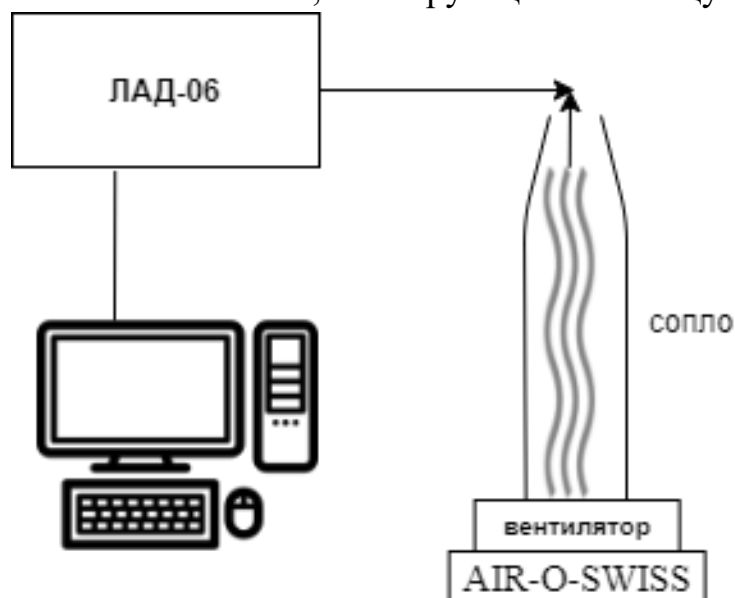


Рис 3. Схема эксперимента

3.2 Методика проведения экспериментов

Было определено расстояние до зоны перетяжки по пересечению пучков на расстоянии 22 см от регистрирующего прибора. Далее устанавливалось сопло таким образом, чтобы его центр совпадал с зоной перетяжки. Паровая установка подключалась к началу сопла вместе с вентилятором, после этого весь пар начал проходить через него и попадать на зону перетяжки. Далее начинался сбор данных. Измерения проводились поточечно. В каждой точке производилось определение выборки значений количеством $N=1000$ событий в точке, время регистрации, было установлено в размере 40 секунд, что позволяло сделать более точные сбор данных. Начальное напряжение было установлено на минимальном значении ФЭУ в размере 40 В и поднималось с шагом 100 В до тех пор, пока не достигло максимума, который составляет 2240 В. По данным измерялось среднее значение компоненты скорости

$$\langle u \rangle = \sum_{i=1}^N u_i$$

где u_i - единичное измерение компоненты скорости из выборки из N событий, $\langle u \rangle$ - среднее значение компоненты скорости.

Для определения длины зоны перетяжки на противоположной стороне измерительной системы был поставлен вращающийся диск. С помощью координатного устройства, встроенного в диск, он перемещался с ходом 20 мкм, пока система не перестала фиксировать параметры точки диска. Действия выполнялись дважды. В начале происходило отдаление от начала координат диска, потом приближение. Данные были изучены и представлены в виде графиков.

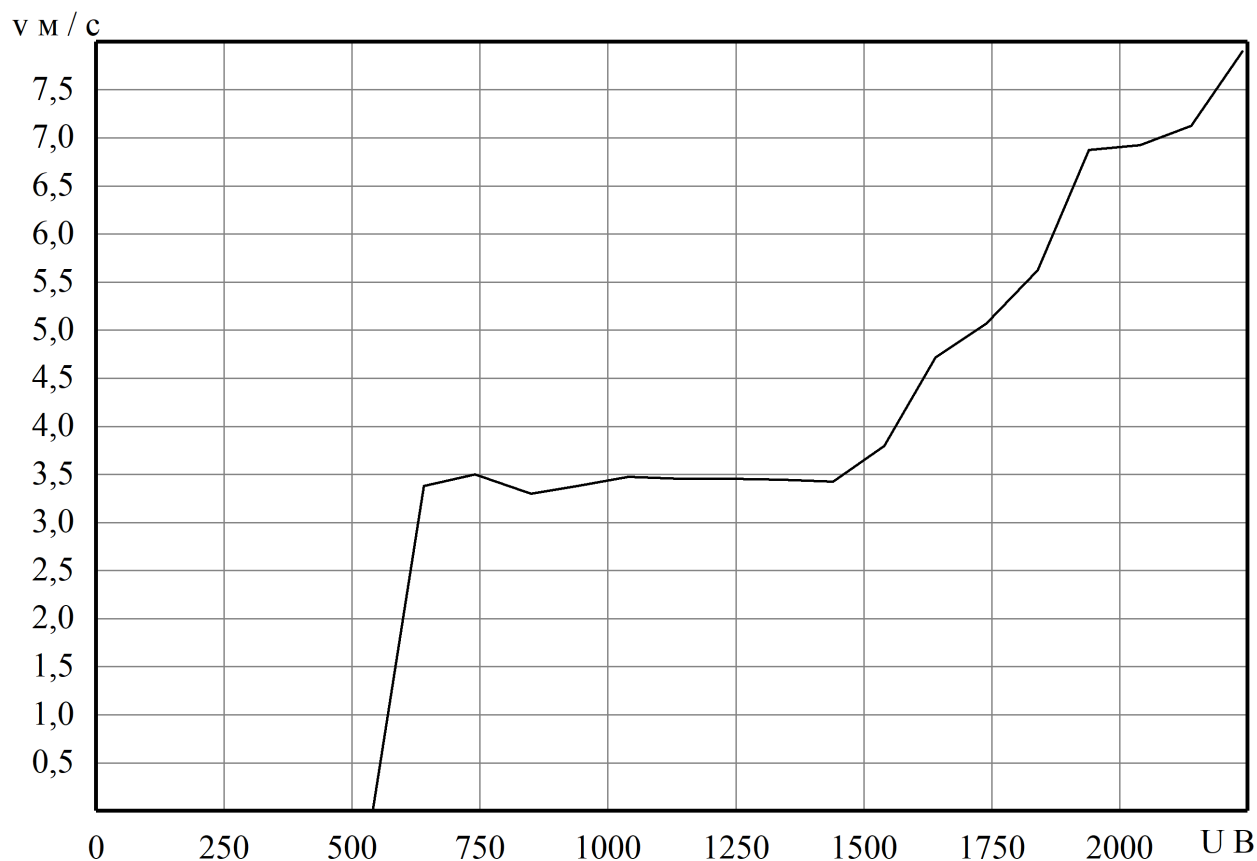
4. Результаты

При начальных минимальных значениях напряжения U прибор ничего не регистрировал. На значении 640 В прошла первая регистрация скорости, ЛАД-06 смог определить скорость одной вылетающей частицы из тысячи. Скорость v составляла 3,38 м/с. Далее при увеличении напряжения средняя скорость приняла определенное значения в размере 3,5 м/с в диапазоне от 1040 В до 1440 В. При повышении напряжения больше этого диапазона виден резкий скачок регистрации скорости частиц v (рис 5). Возникают шумы, которые мешают точной диагностике потока. При максимальном значении напряжения в размере 2240 В

анемометр фиксирует среднюю скорость 7,9 м/с, что говорит о регистрации ложных данных.

Рис 4. График зависимости регистрируемой скорости от напряжения U на ФЭУ

Далее было проведено исследование влияние напряжения на количества вспышек, которые регистрирует прибор.



При значении 480 В зарегистрирована первая вспышка. С увеличением напряжения этот показатель возрастал и в диапазоне 1040 В - 1440 В число вспышек было от 40 до 100. При дальнейшем повышении напряжения возникал резкий скачок регистрации количества вспышек, то есть идет фиксация ложных данных. Этот рост приостанавливается на отметке в 650. Причем, это значение остается постоянным в диапазоне 1940 В – 2240 В, что вероятно, объясняется ограниченным значением вспышек на установленной системе.

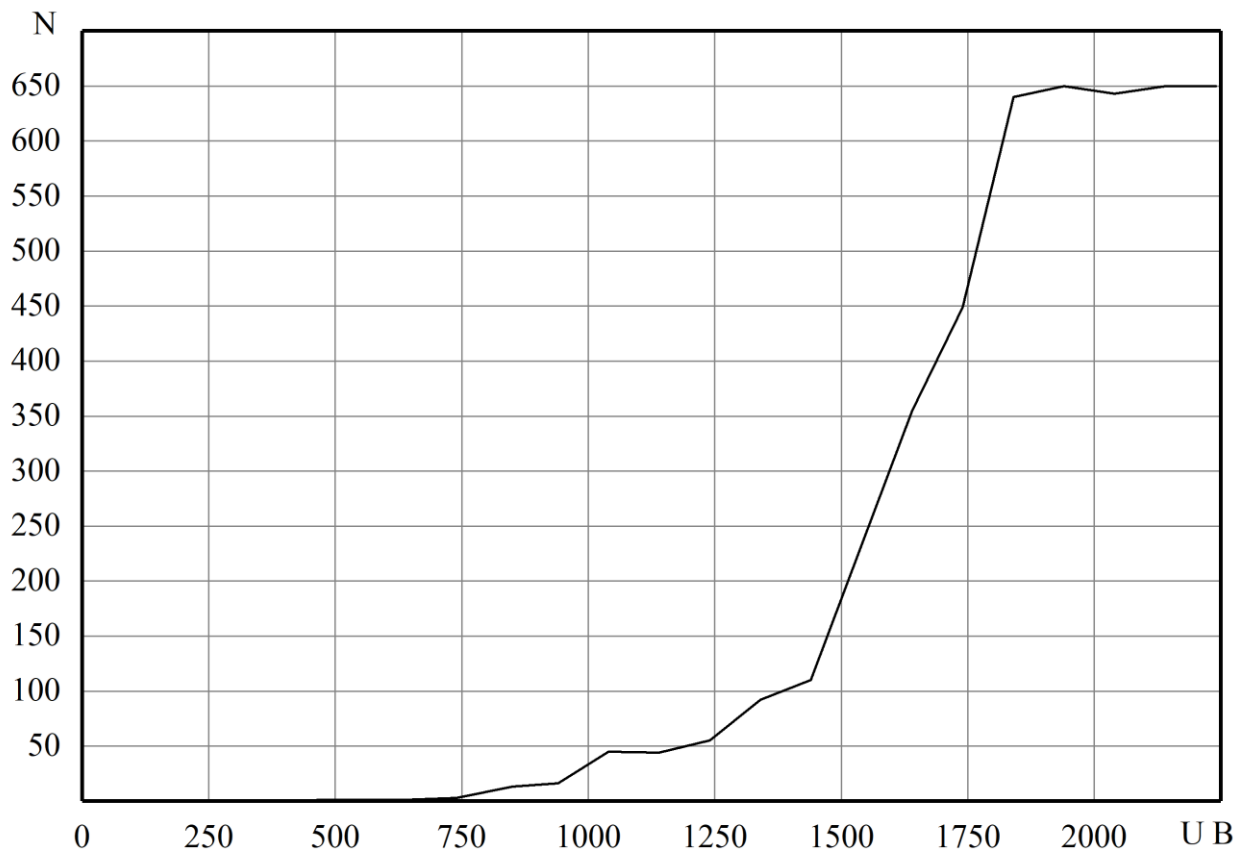


Рис 5. График зависимости количества вспышек N от напряжения U на ФЭУ

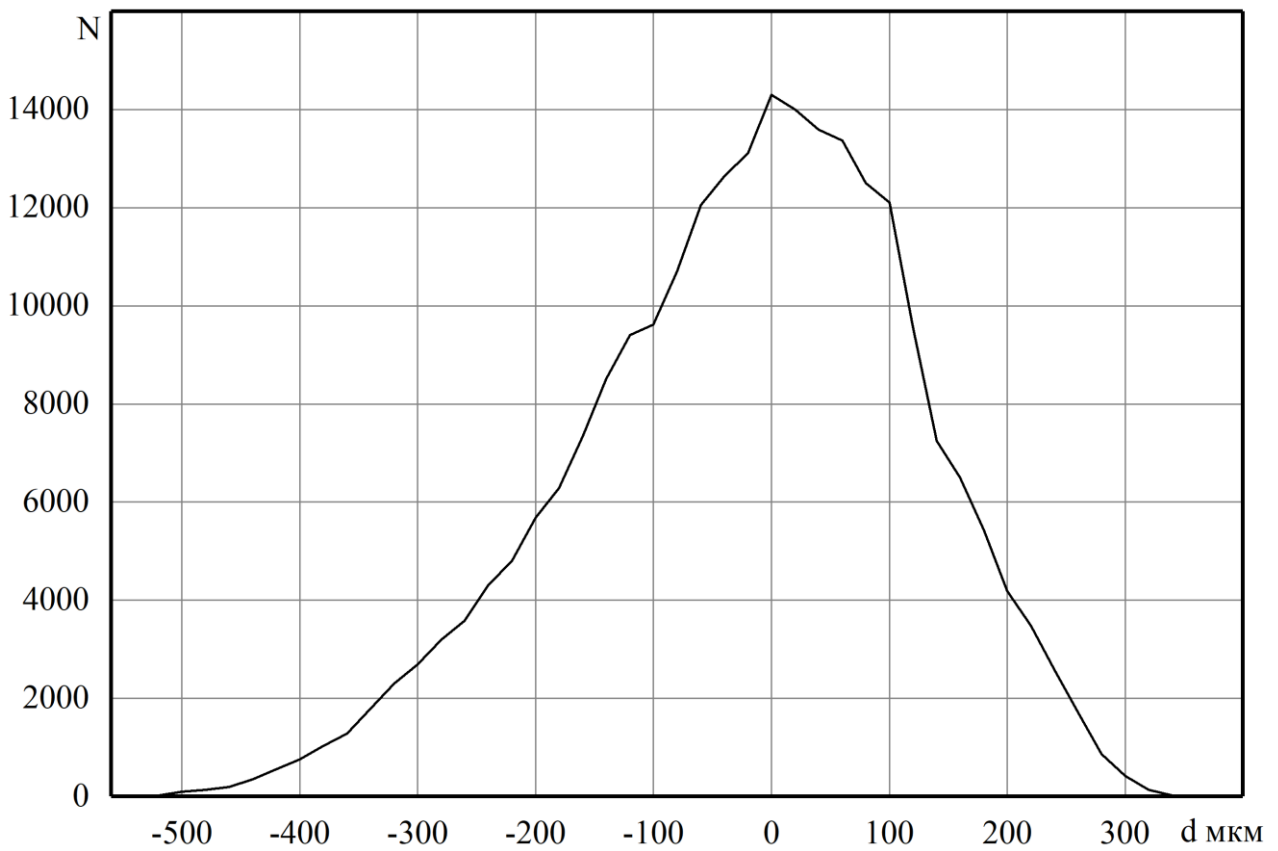


Рис 6. Количество регистрируемых событий в зависимости от смещения зоны измерения

После определения оптимального напряжения, дополнительно были проведены измерения длины зоны перетяжки (рис 6). Первым этапом измерение стало приближение диска. В этом процессе значение регистрирующихся частиц медленно падал, и предельное значение было достигнуто в размере 540 мкм от центра отсчета. Во время отдаления диска, регистрирующие значения уменьшались быстрее и уже на отметке 360 мкм система перестала регистрировать параметры. Таким образом было точно определено место пространства, где происходила регистрация скорости части. Полная длина зоны перетяжки составила 800 мкм, а пространственная разрешающая способность прибора по уровню 0,5 от максимального - 300 мкм.

5. Вывод

Собрана и протестирована установка доплеровского измерения вектора скорости в газожидкостном потоке. Показана применимость выбранной схемы для задач дистанционного измерения скорости в потоках. Выбранная схема отличается простотой и невысокой стоимостью использованных компонентов.

Выявлены характеристики регистрируемого сигнала газожидкостных потоков от напряжения на фотоэлектронном умножителе.

Проанализированы полученные данные графиков и выявлен диапазон напряжений, при котором происходят более точные регистрации с минимальными погрешностями. Эта область составляет 1040 В – 1440 В. Так же был установлен минимальный порог регистрации в значении, который составляет 640 В.

Кроме непосредственного измерения зависимости вектора скорости потока от напряжения выделены и измерены дополнительные явления, такие как: зависимость регистрации количества вспышек от напряжения и определения длины зоны регистрации прибора.

При постепенном повышении напряжения количество возрастало, в области высоких напряжений было замечено постоянное значение 650 вспышек.

Была точно определено место пространства, где происходила регистрация скорости частиц. Длина зоны перетяжки составила 800 мкм, а пространственная

разрешающая способность прибора - 300 мкм, что согласуется с теорией и характеристиками устройства.

6. Список литературы

1. Меледин В. Г., Наумов И. В. Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) для 3D диагностики газожидкостных потоков. Монография: Новосибирск НГУ, 2015 г.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики том 3 Электричество. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977 г.
3. Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н., Вакуумные фотоэлектронные приборы. Редакция издательства "Радио и связь" 1976 г.
4. Жигарев А. А., Шамаева Г. Т. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука» 1982 г.
5. Заглубский А.А., Цыганенко Н.М., Чернова А.П. Учебное пособие по детекторам. СПб., Соло, 2007 г.