

В. В. Рахманов^{1}, М. В. Кашкарова¹, Г. В. Бакакин¹, В. Г. Меледин¹*

Особенности применения ЛДА с различными ФЭУ при диагностике потоков с пульсациями

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: rahmanov@inbox.ru

Аннотация. В работе исследовано поведение трех видов фотоэлектронных умножителей в составе лазерного доплеровского анемометра в задачах определения пульсаций потока. Определены основные критерии оценки качества доплеровского сигнала, и проведен анализ этих критериев для различных типов фотоприемников в серии экспериментов по измерению скорости гидродинамического пульсирующего потока. Полученные в результате анализа данные демонстрируют границы применимости различных типов фотоэлектронных умножителей в зависимости от частоты пульсаций измеряемого потока в диапазоне от 1 до 50 Гц. Все виды фотоприемников показали хорошие результаты в задачах измерения пульсаций до 10 Гц. Это является хорошим показателем для гидродинамических потоков. Для более высоких частот пульсаций наилучшие результаты показали фотоприемники на основе вакуумного фотоэлектронного умножителя и кремниевого мультипиксельного фотоумножителя.

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, фотоэлектронный умножитель, частота пульсации потока

V. V. Rakhmanov^{1}, M. V. Kashkarova¹, G. V. Bakakin¹, V. G. Meledin¹*

Features of Using LDA with Various Photomultipliers in Diagnosing Flows with Pulsations

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: rahmanov@inbox.ru

Abstract. The paper examines the experimental behavior of three types of photomultipliers as part of a laser Doppler anemometer in the problem of determining flow pulsations. The main criteria for assessing the quality of the Doppler signal were determined and an analysis of these criteria was carried out in a series of experiments to measure the speed of a hydrodynamic, clearly pulsating flow with different types of photodetectors. The data obtained of the analysis show the limits of applicability of different types of photomultiplier tubes depending on the pulsation frequency of the measured flow in the range from 1 to 50 Hz. All types of photodetectors showed good results in measuring pulsations up to 10 Hz, which is a good indicator for hydrodynamic flows. For higher pulsation frequencies, photodetectors based on a vacuum photomultiplier and a silicon multipixel photomultiplier showed good results.

Keywords: laser Doppler anemometer, photomultiplier tube, flow pulsation frequency

Введение

Измерение пульсационных характеристик течения является актуальной научно-технической проблемой. Пульсации, характеризующиеся периодическими изменениями скорости, давления или плотности жидкости, являются явлениями первостепенной важности, особенно в контексте динамики ветра и производства гидроэлектроэнергии. Понимание и использование поведения этих потоков имеет решающее значение для оптимизации эффективности, стабильности и безопасности в высокотехнологичных приложениях. В последнее десятилетие эта проблема стала актуальна из-за построения большого количества ветряных электростанций. Изучение влияния пульсационных характеристик потока помогает понять влияние потока за одной турбиной на работу последующих [1]. Также, в гидроэлектростанциях остро стоит проблема оптимизации отсасывающих труб, для уменьшения проблем, связанных с ростом пульсаций вихревых жгутов и разрушением пластин [2–3].

Помимо ветроэнергетики и гидроэнергетики, пульсирующие потоки проявляются в различных инженерных и природных системах, например, в автомобилестроении, биомедицине, океанических средах и др.

Существует множество методов диагностики пульсаций в потоках: термоанемометрия, измерение пульсаций давления на стенках и внутри потока, трекинг-визуализация, лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА), ультразвуковая доплеровская анемометрия, тензометрия и др. Каждый из этих экспериментальных методов имеет свои преимущества и ограничения, а выбор метода зависит от таких факторов, как характеристики потока, необходимое пространственное и временное разрешение результатов измерения и удобство использования.

Наиболее точным неинвазивным методом определения пульсаций скорости потоков является метод ЛДА.

Данная работа посвящена особенностям работы различных типов фотоприемников в ЛДА в контексте изучения пульсационных потоков.

Лазерный доплеровский анемометр измеряет скорость частиц, рассеивающих попадающий на них свет (пузыри, специальные светорассеивающие частицы и естественные светорассеиватели) внутри потока жидкости. При наличии пульсаций скорости потока, измеренная скорость будет принимать вид периодической функции (рис. 1). Очевидно, что чем большее количество частиц в секунду детектируется, тем, потенциально, выше может быть точность измерения частоты пульсаций и значение частоты измеренных пульсаций.

Так как частицы пересекают область измерения в случайные моменты времени, то для достоверного определения частоты пульсаций необходима передискретизация данных скорости для эквидистантного распределения по времени. Выполнять дискретное преобразование Фурье необходимо только после операции передискретизации результатов измерения.

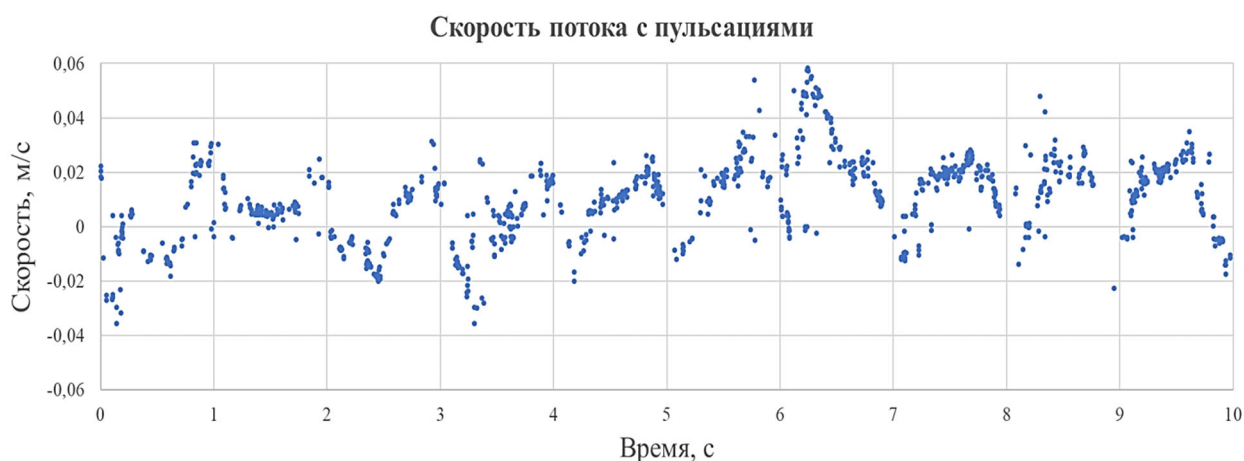


Рис. 1. Скорость потока с периодическими пульсациями

В последнее время достигнут большой прогресс в создании различных видов фотоприемников, которые можно использовать в составе лазерных доплеровских анемометров [4–5]. Однако, имеются существенные различия в работе разных типов фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Одна из особенностей ФЭУ с микроканальной пластиной (МКП-ФЭУ) состоит в том, что у него большая область фотокатода. Когда светорассеивающая частица пересекает лучи строго в измерительной зоне, то все типы ФЭУ «видят» рассеянный частицей свет. Но если частица пересекает лучи вне измерительной зоны, то за счет ограничений внутренней структуры Si-ФЭУ такую частицу не «увидит», так как свет от нее будет вне зоны приема. То же самое с обычным ФЭУ. Однако для МКП-ФЭУ критично, чтоб было задействована как можно большая поверхности фотокатода. И в случае прохождения частицы вне измерительной зоны, данный ФЭУ «увидит» этот паразитный сигнал, что создает дополнительные шумы.

В данной работе предлагается оценить работу ЛДА с разными видами ФЭУ при диагностике пульсационных потоков. Качество работы ЛДА будет оцениваться на основе следующих критериев: количество зарегистрированных частиц в единицу времени, разрешение частот пульсаций в диапазоне от 1 до 50 Гц, среднеквадратические отклонения (СКО) результата измерения скорости для разных частот пульсаций.

Экспериментальный стенд

В качестве фотоприемников использовались три типа ФЭУ (рис. 2): классический вакуумный диодный ФЭУ Hamamatsu тип R6358-10, микропиксельный кремниевый фотоумножитель (Si-ФЭУ) КЕТЕК РМ3325-WB и МКП-ФЭУ 6776 ЗАО "ЭКРАН ФЭП" с двумя последовательными микроканальными пластинами. Все три ФЭУ обладают высоким усилением $\sim 10^6$ и достаточным быстродействием для работы в ЛДА со смещением несущей частоты.

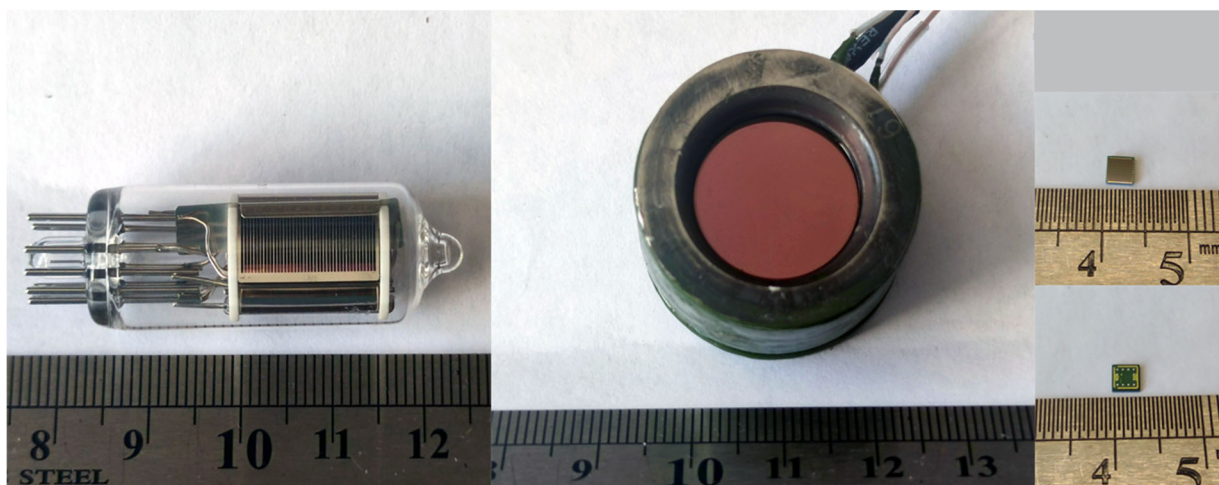


Рис. 2. Три типа ФЭУ, использующихся в экспериментах. Слева-направо: классический ФЭУ, МКП-ФЭУ и Si-ФЭУ

Каждый ФЭУ вместе со своими источниками питания устанавливался в качестве фотоприемника в экспериментальный ЛДА ЛАД-05М.

В качестве тестового объекта выбран пульсирующий знакопеременный поток от лопаток ротора, погруженных в воду. Измерения скорости потока проводились при различной частоте вращения ротора Ω от 30 до 1500 оборотов в минуту. Так как частота вращения задавалась приблизительно при помощи потенциометра, то для более точного определения частоты, она восстанавливалась по видеосъемке. При этом погрешность такого метода составила около 10%. Однако этого достаточно для оценки работоспособности фотоприемников в данных экспериментах.

Точка измерения скорости находилась на расстоянии 3 мм от края лопаток (рис. 3). Каждое измерение длилось 60 секунд. За это время набиралась достаточная статистика для оценки СКО и построения спектра пульсаций скорости.

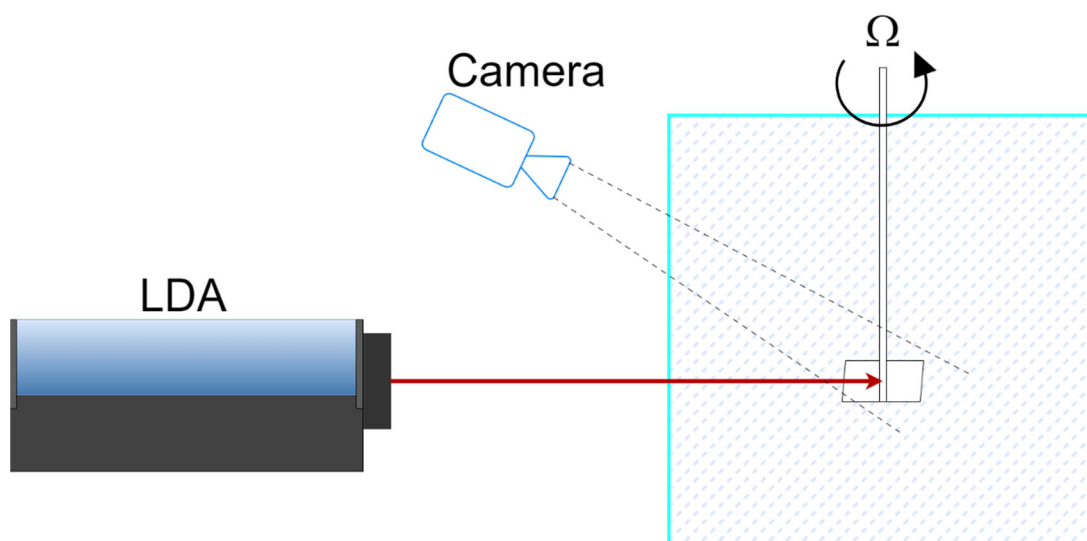


Рис. 3. Схема экспериментального стенда

Ожидаемая частота пульсаций скорости должна быть равна удвоенной частоте вращения ротора, так как использовался винт ротора с двумя лопастями.

На рис. 4 показан спектр пульсаций для фотоприемника Si-ФЭУ на частоте вращения ротора около 30 оборотов в минуту. Основная частота пульсации потока составляет 1,1 Гц, и видна вторая гармоника на частоте 2,2 Гц. Отношение максимума в пике к средней интенсивности составляет более 6 раз.



Рис. 4. Спектр пульсаций при 30 оборотах в минуту

Результаты

Была выполнена серия экспериментов по измерению скорости потока с пульсациями для трех разных видов ФЭУ.

Вакуумный ФЭУ и Si-ФЭУ позволили измерить частоты пульсации в диапазоне от 1 до 50,5 Гц. Однако МКП-ФЭУ не позволил измерить частоты пульсаций выше 10 Гц. Данные по измеренным пульсациям для разных типов ФЭУ приведены в табл. 1.

Отклонение измеренных частот пульсаций от заданных – не более 10%, что соответствует точности задания частоты пульсаций. Несмотря на то, что частоту пульсаций после 7 Гц разрешить для МКП-ФЭУ не удалось, СКО пульсаций скорости удалось померить во всем диапазоне. Из графика на рис. 5 видно, что СКО растет с ростом частот пульсаций для всех типов. Ось ординат приведена в логарифмическом масштабе. Максимальные СКО скорости зарегистрированы для МКП-ФЭУ, а минимальные – для Si-ФЭУ.

Заданные и измеренные частоты пульсаций

Частота по видео, Гц	Частота вакуум. ФЭУ, Гц	Частота Si-ФЭУ, Гц	Частота МКП-ФЭУ, Гц
1,0	1,0	1,1	1,3
1,8	1,8	1,8	1,7
3,5	3,6	3,6	3,8
7,0	7,1	7,2	6,7
12,1	12,4	12,0	-
31,0	31,3	30,1	-
50,5	53,3	52,6	-

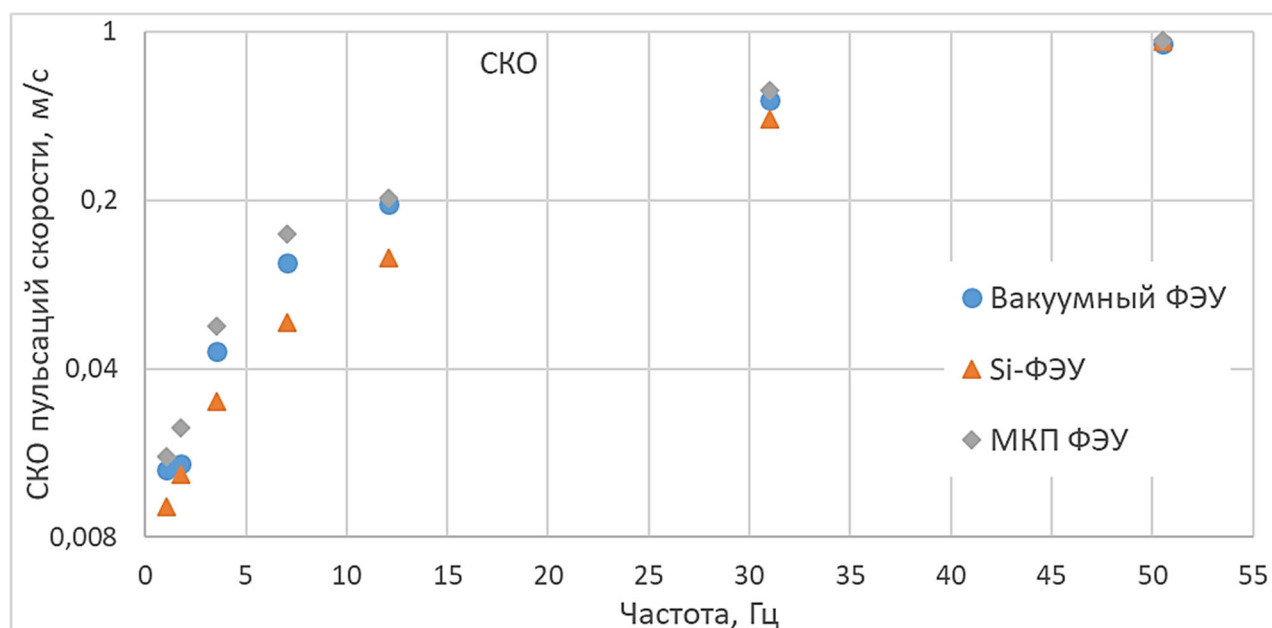


Рис. 5. СКО пульсаций скорости для трех типов фотоприемников

Другим важным параметром работы фотоприемника в составе ЛДА является соотношение амплитуды сигнала к амплитуде пьедестала. Чем меньше данное значение, тем выше погрешность определения доплеровской частоты.

Еще один параметр, отвечающий за разрешение пульсаций – количество зарегистрированных достоверных доплеровских вспышек в секунду. Этот параметр характеризует качество сигнала, регистрируемое ЛДА. В табл. 2 приведены данные для всех экспериментов.

Как видно из приведенных данных, наибольшее количество вспышек в секунду получено с применением Si-ФЭУ. Наименьшее значение получено для МКП-ФЭУ. Данный параметр отражает чувствительность (квантовую эффективность) фотоприемников на длине волны лазерного излучения 660 нм. Так, для Si-ФЭУ она составляет 15%, для вакуумного ФЭУ – 9% и для МКП-ФЭУ – 6%.

Количество достоверных вспышек в секунду

Частота, Гц	Вак. ФЭУ, шт/с	Si-ФЭУ, шт/с	МКП-ФЭУ, шт/с
1,0	102	310	65
1,8	156	564	40
3,5	207	879	55
7,0	283	1264	60
12,1	302	1579	70
31,0	312	1393	113
50,5	407	2065	136

Из данных для МКП-ФЭУ из табл. 1 и 2 видно, что, в случае, если соотношение количества вспышек в секунду к частоте пульсаций больше 8,5, то частота определяется корректно. При понижении этого параметра до значений менее 6, частота пульсаций не определяется. По-видимому, число 6 является критическим параметром для этого значения в случае неравномерно распределенных по времени данных.

Заключение

В ходе проведенных экспериментов по изучению особенностей применения ЛДА с различными видами фотоэлектронных умножителей при диагностике потоков с пульсациями было установлено, что все виды ФЭУ показали хорошие результаты в задачах измерения пульсаций до ~10 Гц. Однако в случае задач с частотами пульсаций более 10 Гц, использование МКП-ФЭУ не позволяет эффективно измерять параметры пульсаций. Это может быть связано с сочетанием двух факторов:

- высокими собственными шумами МКП-ФЭУ;
- низкой квантовой эффективностью на длине волны лазерного излучения 660 нм.

В результате сложения этих факторов, используемый в ЛДА алгоритм определения доплеровской частоты по методу центра масс не позволяет уверенно детектировать сигналы с высоким уровнем шума, так как количество зарегистрированных достоверных доплеровских вспышек за единицу времени получается существенно ниже, чем при применении двух других типов ФЭУ.

При этом Si-ФЭУ и классический вакуумный ФЭУ продемонстрировали качественно одинаковые результаты при определении частот пульсаций вплоть до 50 Гц, что является хорошим показателем для большинства гидродинамических задач.

Наименьшее значение СКО скорости потока и максимальное количество достоверных вспышек в секунду достигнуто с применением Si-ФЭУ, что делает его оптимальным вариантом для использования в ЛДА при измерении пульсирующих гидродинамических потоков.

Для задач изучения пульсаций аэродинамических течений требуются дальнейшие исследования, так как пульсации таких течений могут достигать десятков килогерц. Тем не менее, уже сейчас можно утверждать, что ЛДА с Si-ФЭУ в качестве фотоприемника является перспективным направлением развития лазерной доплеровской анемометрии, а применение МКП-ФЭУ больше подойдет для менее требовательных задач.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00203.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. I V Naumov et al 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 854 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/854/1/012034>.
2. Cassidy J.J., Falvey H.T. Observation of unsteady flow arising after vortex breakdown // Journal of Fluid Mechanics 41 – 1970, P. 727–736.
3. Суслов Д. А., Литвинов И. В., Гореликов Е. Ю. Сравнительный анализ пульсаций давления, вызванных спирально-вихревыми структурами в проточной части модели гидротурбины // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21, №3. – С. 49–56. <http://dx.doi.org/10.14529/power210306>.
4. V. V. Rakhmanov et al., Application features of micro-pixel avalanche photodetectors in the laser Doppler anemometers, 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2057 012088.
5. A.Y. Barnyakov et al., Investigation and development of microchannel plate phototubes, Nucl. Instrum. Meth. A 572 (2007) 404.

© В. В. Рахманов, М. В. Кашкарова, Г. В. Бакакин, В. Г. Меледин, 2024