
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ/OPTICAL AND OPTOELECTRONIC DEVICES AND COMPLEXES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59> EDN: VQQHFE**АНАЛИЗ ШУМОВЫХ КОМПОНЕНТ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПРИ ОБТЕКАНИИ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ В УСЛОВИЯХ РАЗРЕЖЕННОЙ СРЕДЫ**

Научная статья

Дегоян С.С.^{1,*}, Софуюев Д.В.², Скорнякова Н.М.³¹ORCID : 0009-0007-3835-6183;²ORCID : 0000-0001-8308-7356;³ORCID : 0000-0002-2919-6428;^{1, 2, 3}Московский энергетический институт, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (degoyanss[at]mpei.ru)

Предложена: 01.05.2026; Принята: 06.07.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

В работе представлены способы и алгоритмы обнаружения, измерения и оценивания числа квазидетерминированных и стохастических сигналов при наличии случайных искажений и артефактов на изображениях обтекания разреженным воздушным потоком тел с известными параметрами шероховатости. С помощью лазерного комплекса регистрация изображений мгновенного пространственного распределения скоростей осуществляется без воздействия на воздушный поток, что делает его подходящим для изучения сложных турбулентных течений и для анализа обтекания низкоскоростными потоками воздуха тел в разреженных средах. В статье представлены теоретические и экспериментальные исследования, позволяющие описать составляющую шумовой компоненты изображений, полученных в разреженной среде. Результаты могут быть использованы в аэродинамической технике, а также в других областях, связанных с изучением обтекания тел в различных условиях.

Ключевые слова: методы визуализации потоков, разреженная среда, оценка шумовой компоненты, методы фильтрации, Фурье образ, квазидетерминированные изображения.

ANALYSIS OF NOISE COMPONENTS IN IMAGES OF AIRFLOW AROUND AN OBJECT IN A RAREFIED MEDIUM

Research article

Degoyan S.S.^{1,*}, Sofuev D.V.², Skornyakova N.M.³¹ORCID : 0009-0007-3835-6183;²ORCID : 0000-0001-8308-7356;³ORCID : 0000-0002-2919-6428;^{1, 2, 3}Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (degoyanss[at]mpei.ru)

Suggested: 01.05.2026; Accepted: 06.07.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

The work presents methods and algorithms for detecting, measuring and estimating the number of quasi-deterministic and stochastic signals in cases of random distortions and artifacts in images of rarefied airflow around bodies with known roughness parameters. Using a laser system, images of the instantaneous spatial velocity distribution are recorded without disturbing the airflow, making it suitable for studying complex turbulent flows and for analysing the flow around bodies in rarefied media with low-speed airflows. The article presents theoretical and experimental studies that describe the noise component of images obtained in a rarefied medium. The results can be applied in aerodynamic engineering, as well as in other fields related to the study of flow around bodies under various conditions.

Keywords: flow visualisation methods, rarified medium, noise component evaluation, filtering methods, Fourier transform, quasi-deterministic images.

Введение

Составляющие шума — это, ложная информация, которая накладывается на основной сигнал и изменяет его структуру. Накопление такой избыточной информации значительно снижает качество визуальных данных, образуя нечёткие контуры, артефакты и размытые детали. Это, в свою очередь, сказывается на эффективности последующих этапов обработки изображений, в частности анализа визуальных данных и распознавания объектов. Появление шумовых помех на цифровых изображениях вызвано комплексным воздействием внешних факторов, включая параметры окружающей среды, характеристики каналов передачи данных и другие источники искажений. При визуализации воздушных потоков причинами возникновения шумов могут являться локальные изменения плотности газа или температуры, которые приводят к неравномерному рассеянию света и появлению шумовых пятен.

В разреженных средах, таких как верхние слои атмосферы, плотность среды ниже и можно сделать вывод, что шумовая составляющая оказывает меньшее влияние на качество получаемых изображений. Однако существуют

внешние засветки из-за отражений от поверхностей тел и ложные артефакты на кадре в результате турбулентных вихрей. После такого воздействия информация по изображению искажается. Задача подавления шума сводится к улучшению качества, сохранению исходных данных и уменьшению помех на полученных кадрах. В работе [1] перечислены основные группы методов шумоподавления делятся на:

- 1) локальный (градиационный) анализ пиксельной окрестности (точечная и пространственная фильтрация);
- 2) преобразование изображения в частотную область с последующей фильтрацией (частотная фильтрация).

В трудах [2] рассматриваются методы пространственной фильтрации удаляют шум путём анализа локальных связей пикселей в исходном изображении. Основной принцип заключается в вычислении интенсивности каждого пикселя на основе корреляции с соседними областями, после чего выполняется усреднение для подавления помех. Нелокальные методы используют взвешенное усреднение пикселей из областей с аналогичной структурой, что повышает точность оценки интенсивности текущего пикселя и снижает влияние шума. В исследованиях пространственной фильтрации изображений воздушного потока широко используются методы, основанные на различных подходах к обработке шумовых составляющих. Таким образом, использование пиксельного усреднения позволяет уменьшить высокочастотные помехи за счет локального вычисления средней интенсивности, что было подробно проанализировано в [3]. Медианная фильтрация, как показали эксперименты [4], эффективно устраняет импульсный шум, сохраняя при этом четкость границ объекта, что особенно важно для визуализации турбулентных структур. Математическая морфология часто используется для анализа формы и структуры объектов на изображениях в оттенках серого, принципы работы которой описаны в исследовании [5]. Для плавного сглаживания изображений с учетом нормального распределения весов используется гауссово размытие, методика которого подробно рассмотрена в [6]. Согласно [7], вейвлет-преобразования обеспечивают многомасштабный анализ, который позволяет адаптивно подавлять шум на различных уровнях детализации. В задачах уменьшения размерности данных без существенной потери информации используется метод главных компонент, эффективность которого подтверждена в [8]. Наконец, анизотропная диффузия, предложенная в [9], предлагает нелинейный подход к фильтрации, адаптивно сглаживающий изображение в зависимости от локальных градиентов интенсивности, что особенно ценно для сохранения границ объектов в условиях сложных потоков.

Методика исследования

Каждый из описанных методов фильтрации обладает своими преимуществами и возможностями, что определяет их выбор в зависимости от специфики шумовых помех и требований к качеству визуализации. Особенность изображений трассеров, получаемых в разреженных потоках, заключается в их малом количестве, поэтому появление шума значительно влияет на качество отображения частиц. Исследование [10] подтверждает, что большинство методов визуализации потоков зависят от структуры и плотности самого потока, а также насыщенности трассерами. Например, в методе анемометрии по изображениям частиц (АИЧ), описанном в статье [11], предполагается, что на одно окно опроса должно приходиться минимум 40 пар трассеров, однако в разреженном потоке их будет меньше. Это связано с особенностями засеивания частиц в установку после вакуумации и возможностью их поднятия после попадания в поток [12]. Экспериментальные изображения получены на оптико-электронном комплексе для исследования обтекания тел различной формы и степени шероховатости воздушным потоком в разреженной среде, который разработан авторами [13]. 3D модель экспериментальной установки показана на рисунке 1.

В основе установки лежит оптическая система с непрерывным полупроводниковым лазерным модулем мощностью 4 Вт и длиной волны 480 нм. Формирует лазерную плоскость оптическая система с цилиндрической линзой. Сама плоскость служит для подсветки двумерного сечения исследуемой области, содержащей частицы-трассеры. Закачку частиц осуществляет генератор аэрозоля. Для получения кадров используется высокочастотная цифровая камера с объективом с фокусным расстоянием 50 мм. Далее изображения передаются на компьютер со специально разработанным авторами [14] и установленным ПО для дальнейшего анализа и обработки.

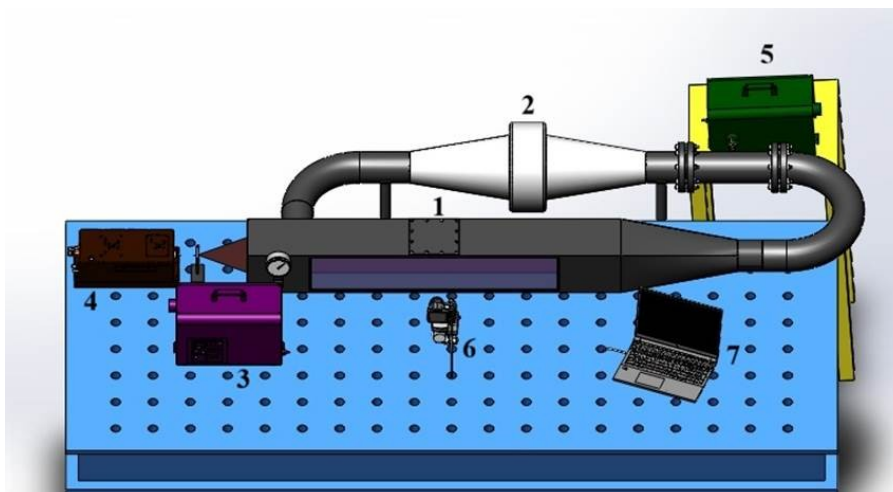


Рисунок 1 - Модель экспериментальной установки:

1 – источник излучения; 2 – измерительный объем; 3 – система формирования потока (вентилятор); 4 – конус с хонейкомбом внутри; 5 – система засеивания потока трассерами; 6 – датчик давления (манометр); 7 – система вакуумирования; 8 – приемник излучения (цифровая камера); 9 – компьютер со специализированным программным обеспечением; 10 – система формирования лазерной плоскости

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.1>

Вакуумирование осуществляется вакуумным насосом, давление в измерительном объеме порядка 0,5 атм. Электронным манометром измеряется давление и температура, системы шлангов и кранов дают возможность управлять переходом между режимами вакуумирования, герметизации и разгерметизации.

На рисунке 2 представлена реализованная установка.



Рисунок 2 - Разработанный оптико-электронный комплекс

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.2>

Построение модели и оценка параметров изображения

В качестве опытного образца взята круглая пластина диаметром 30 мм. Внешний вид пластин показан на рисунке

3.



Рисунок 3 - Круглая пластина с гладкой поверхностью

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.3>

Исходные данные:

Длина пластины ($L_{\text{реальная}}$) = 30 мм = 0,03 м

Ширина области съёмки ($N_{\text{реальная}}$) = 34,72 мм = 0,03472 м

Размер кадра ($M \times N$) = 1216 x 256 пикселей

Перевод длины пластины в пиксели важен для точного определения границ пластины на изображении. Зная длину пластины в пикселях, можно корректно сгенерировать опорный сигнал для дальнейшего анализа.

$$L_{\text{пиксели}} = \frac{L_{\text{реальная}} \cdot M}{M_{\text{реальная}}} = \frac{0,03 \cdot 1216}{0,03472} \approx 1048, \quad (1)$$

где M — длина кадра в пикселях, а $M_{\text{реальная}}$ — реальная длина области съёмки.

В кросскорреляционной модели необходимо на кадрах сравнить реальный и опорный сигнал. Для анализа реального сигнала выбирается линия на изображении (строка по номеру пикселя «N»). Эта строка преобразуется в одномерный сигнал $x(t)$, где t — горизонтальная координата пикселя. Перемещение частиц трассеров в воздушном потоке зависит не только от параметров среды, но и от структуры поверхности обтекаемого объекта, об этом неоднократно упоминается в работе [15], поэтому, строка выбирается таким образом, чтобы свести к минимуму влияние возможных искажений на кадре, а также упростить дальнейшую обработку сигнала. Опорный сигнал моделирует идеальное изображение пластины без шумов. Опорный сигнал $y(t)$ — это прямоугольные импульсы, отображающие нахождение частиц в кадре в соответствии со значением яркости.

Кросскорреляция позволяет определить сдвиг, при котором сигналы $x(t)$ и $y(t)$ максимально совпадают. Это необходимо для точного совмещения опорного сигнала с реальным изображением пластины.

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{t=0}^{M-1} x(t) \cdot y(t + \tau). \quad (2)$$

Вычисляем кросскорреляцию между сигналом $x(t)$ и опорным сигналом $y(t)$. Находим значение $\tau_{\max}$, при котором $R_{xy}(\tau)$ максимально. Разность между принятым сигналом $x(t)$ и опорным сигналом $y(t)$, сдвинутым на $\tau_{\max}$, даёт оценку шумовой компоненты.

$$sh(t) = x(t) - y(t + \tau_{\max}). \quad (3)$$

Эта разность позволяет выделить шумовые компоненты, которые искажают идеальное изображение пластины. Анализ $sh(t)$ даёт представление о характере и интенсивности шумов.

Для построения квазиравноподобной модели представляем изображение пластины как суперпозицию полезного сигнала и шума. Полезный сигнал — импульсы, отображающие максимальное значение яркости пикселей на кадре. Шум — гауссовское распределение σ^2 с неизвестной интенсивностью. Такая модель позволяет разделить полезный сигнал и шум, что необходимо для оценки уровня шумовых помех. Для дальнейшего расчета и оценки параметра дисперсии используется логарифм функции правдоподобия. Эта функция позволяет оценить параметр σ^2 , характеризующий распределение шума. Максимизация $L(\sigma^2)$ даёт оптимальную оценку дисперсии шума.

$$L(\sigma^2) = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{t=0}^{M-1} (x(t) - y(t + \tau_{\max}))^2 - \ln(2\pi\sigma^2). \quad (4)$$

Эта формула позволяет количественно оценить уровень шума на изображении. Чем меньше значение $\hat{\sigma}^2$, тем меньше шумовых помех присутствует в сигнале.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{M-1} (x(t) - y(t + \tau_{\max}))^2. \quad (5)$$

Результаты оценки шумовой компоненты

Во ходе исследования пластины устанавливались в центре измерительной ячейки. Далее в рабочем объеме создавалось давление 0,5 атм, а после введения частиц в разреженную среду наблюдалось повышение давления до 0,55 атм. При получении изображений экспозиция уменьшена до 80 мкс для избавления от треков (Трек — это видимый след траектории движения, который оставляет частица), а учитывая недостаточную плотность мощности используемого лазера для обеспечения требуемой экспозиции, было решено увеличить чувствительность регистрирующей камеры. Однако такой подход привел к появлению артефактов на получаемых изображениях из-за шумов матрицы.

В связи с чем появилась необходимость фильтрации изображений. Принято решение использовать метод фильтрации изображений нелокальными средними (НЛС, в англоязычной литературе Non-Local Means) — это алгоритм шумоподавления, который учитывает не только локальные пиксели (как в классических фильтрах, например, гауссовом или медианном), но и анализирует сходство участков изображения, находящихся на большом расстоянии друг от друга. Вместо усреднения значений пикселей в небольшой окрестности (как в фильтре Гаусса), выполняется поиск похожих областей по всему изображению и усредняет их значения на основе степени сходства. В статье [16] рассматривается алгоритм НЛС. Где коэффициент сходства («вес») рассчитывается по формуле:

$$\omega_{p,q} = e^{-\frac{\|u(N_p^r) - u(N_q^r)\|_{2,a}^2}{h^2}}, \quad (6)$$

где p, q — координаты пикселей, N_p^r — окрестность усреднения, h — параметр сглаживания, r — размер окрестности.

Значение зашумленного сигнала по некоторой окрестности находится следующим образом:

$$\tilde{u}_p = \frac{\sum_{q \in N_p^R} \omega_{p,q} u_p}{\sum_{q \in N_p^R} \omega_{p,q}}, \quad (7)$$

где u_p — исходный зашумленный сигнал, $\tilde{u}_p$ — сигнал после фильтрации.

Чем больше сходство между участками, тем больший коэффициент присваивается их значениям при усреднении.

Данный метод фильтрации был применен к изображениям, на которых зафиксированы частицы в разреженном потоке. На рисунке 4 изображение пластины с гладкой поверхностью без применения фильтра.

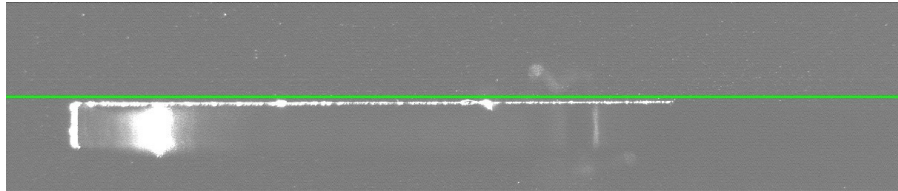


Рисунок 4 - Изображение пластины с гладкой поверхностью до обработки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.4>

Для анализа всех изображений выбрана строка кадра, соответствующая координате 128 пикселя по вертикали (показано в виде линии). Для оценки шумовой компоненты были построены графики и выведены значения кросскорреляции и дисперсии шума. Дисперсия шума показывает, насколько сильно значения интенсивностей пикселей отклоняются от среднего значения. В контексте изображений это обычно уровень шума, присутствующего в изображении. На рисунке 5 график логарифма функции правдоподобия до обработки и значение дисперсии шума.

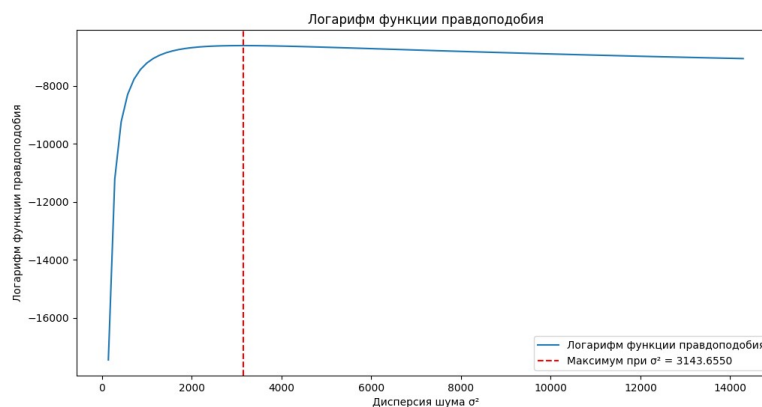


Рисунок 5 - График логарифма функции правдоподобия до обработки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.5>

В 8-битных изображениях интенсивности пикселей варьируются от 0 до 255.

Если изображение содержит много мелких деталей или текстур, то значения дисперсии шума могут быть довольно высокими. Для удобства оценки распишем некоторые интервалы по значениям дисперсии:

- 1) низкий уровень шума: σ^2 меньше 100;
- 2) средний уровень шума: σ^2 от 100 до 400;
- 3) высокий уровень шума: σ^2 больше 400.

Для более детального отображения частиц построен график интенсивности яркости пикселя от координаты на рисунке 6. Зеленым прямоугольниками отмечены координаты частиц, а красным прямоугольником наложена маска на область в кадре, где находится держатель пластины («лапка»).

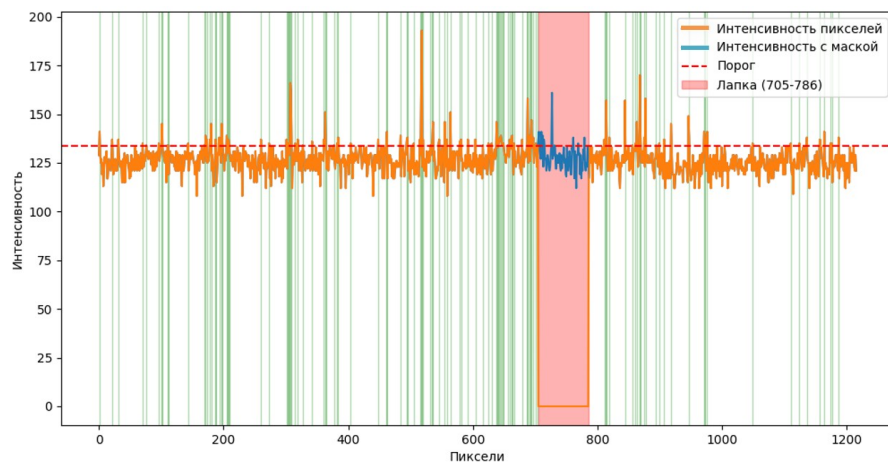


Рисунок 6 - График интенсивности частиц от координаты на 128 строке до обработки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.6>

По графику можно сказать, что интенсивность пикселей сильно варьируется, и наблюдается множество выбросов. Из-за низкой контрастности пики интенсивности частиц слабо выделяются на фоне шума. Значения интенсивности частиц часто не превышают порогового значения, что затрудняет их обнаружение.

Однако, выше рассматривается анализ по одной строке. Для пространственного анализа изображений применимо Фурье преобразование. Преобразование Фурье — это математический инструмент, который позволяет представлять сигналы или функции в виде суммы гармонических колебаний с различными частотами. В контексте пространственной обработки изображений Фурье-образ используется для анализа пространственных частот. Центр изображения в формате Фурье соответствует низким частотам (общему фону). Периферия — высоким частотам (детали, контуры). Яркие точки — это сильные частотные составляющие. На рисунке 7 Фурье образ необработанного изображения пластины с гладкой поверхностью.

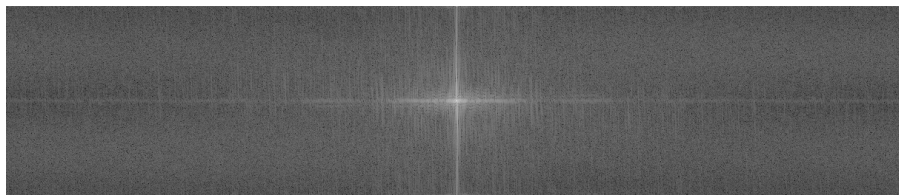


Рисунок 7 - Фурье образ необработанного изображения пластины с гладкой поверхностью
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.7>

Яркие горизонтальные и вертикальные линии, проходящие через центр, соответствуют периодическим структурам на изображении (например, полосам, сеткам, обычным текстурам). Эти линии размытые и нечеткие. Это указывает на наличие периодических структур, но с шумом или неровностями.

Чтобы изображение Фурье образа имело тот же размер, что и исходный кадр, то оно должно быть дополнено нулями. Для построения Фурье спектра берется изображения как функция $f(x, y)$ размером $M \times N$ и определяется как:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot e^{-i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (9)$$

где $F(u, v)$ — комплексное число, которое соответствует одной гармонике с определённой частотой. На рисунке 8 представлен Фурье спектр необработанного изображения. Спектр зашумленный и нерегулярный. Частотные пики нечеткие, и присутствует много небольших флуктуаций. Это указывает на наличие высокочастотного шума и неоднородных периодических структур.

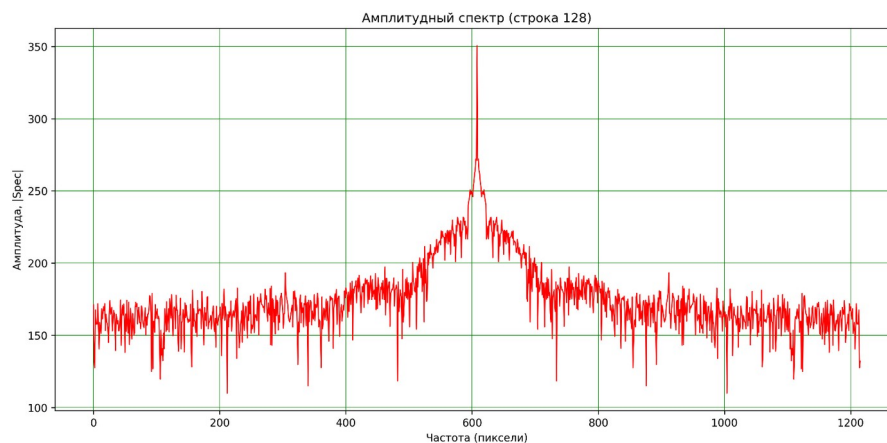


Рисунок 8 - Фурье спектр необработанного изображения пластины с гладкой поверхностью
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.8>

На рисунке 9 изображение пластины с гладкой поверхностью после обработки. Для улучшения визуального качества оценивания была применена пороговая фильтрация, а именно увеличена резкость изображения и повышен контраст.

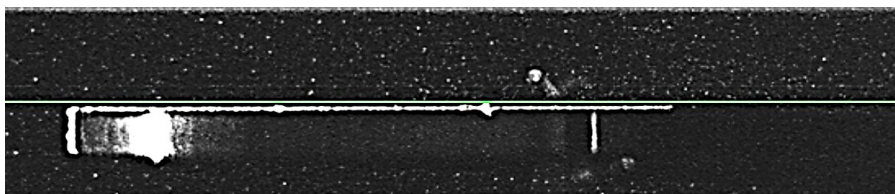


Рисунок 9 - Изображение пластины с гладкой поверхностью после обработки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.9>

На рисунке 10 график логарифма функции правдоподобия после обработки и значение дисперсии шума. На рисунке 11 представлен график интенсивности частиц, на котором наблюдается, что интенсивность пикселей стала более гладкой, выбросов стало меньше. Пики интенсивности стали более выраженными, четко видны участки, превышающие порог.

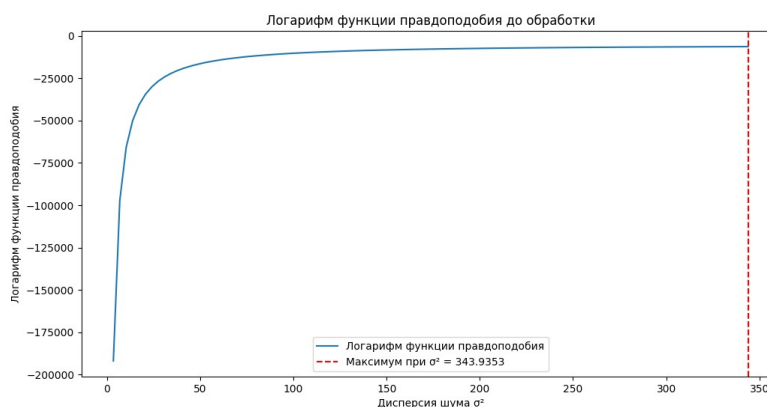


Рисунок 10 - График логарифма функции правдоподобия после обработки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.10>

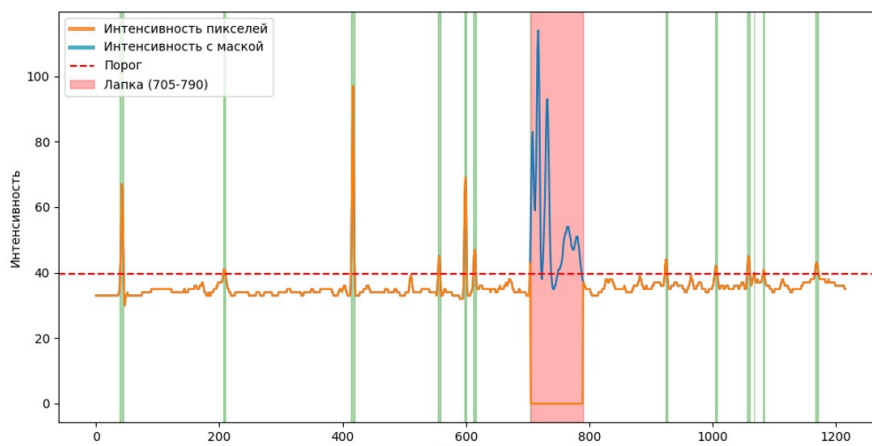


Рисунок 11 - График интенсивности частиц от координаты на 128 строке после обработки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.11>

На рисунке 12 Фурье образ обработанного изображения пластины с гладкой поверхностью. Яркое пятно в центре указывает на наличие низкочастотной компоненты, например фона. Горизонтальные и вертикальные линии стали более четкими и яркими. Края образа стали более гладкими, с меньшим количеством мелких ярких точек, что означает, что высокочастотный шум подавлен.

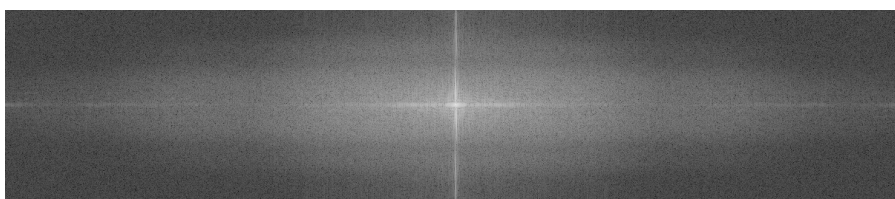


Рисунок 12 - Фурье образ обработанного изображения пластины с гладкой поверхностью

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.12>

На рисунке 13 представлен график Фурье спектра обработанного изображения пластины с гладкой поверхностью.

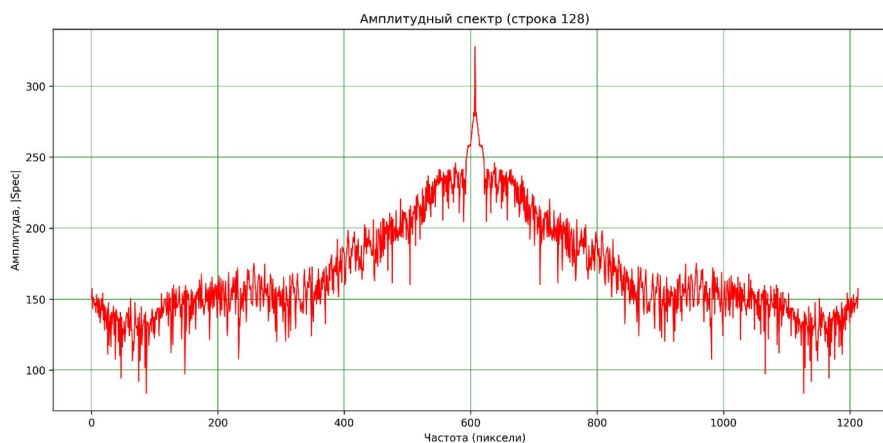


Рисунок 13 - График Фурье спектра обработанного изображения пластины с гладкой поверхностью

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.59.13>

Спектр более гладкий по сравнению с рисунком 8. Пик стал более резким и высоким, что указывает на усиление структур на кадре (интенсивностей частиц). Уменьшилось количество мелких колебаний, что указывает на подавление высокочастотной составляющей шума.

Заключение

В ходе проведенного исследования были рассмотрены способы и алгоритмы обнаружения, измерения и оценивания числа квазидетерминированных и стохастических сигналов на изображениях обтекания тел воздушным



потоком в условиях разреженной среды. Проанализированы изображения, полученные на лазерном комплексе для регистрации мгновенного пространственного распределения скоростей без воздействия на воздушный поток. В условиях разреженных потоков (0,5 атм) важно обрабатывать изображения для улучшения обнаружения частиц. Чем меньше количество частиц, тем важнее точность их обнаружения, поскольку ошибки могут оказать большое влияние на конечные результаты. Произведен анализ влияния шумов и рассмотрены алгоритмы, методики их устранения для повышения качества изображений. В результате применения пороговой фильтрации и метода нелокальных средних, значение интенсивности шума снизилось на 34%.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта государственного задания № FSWF-2026-0010.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment project No. FSWF-2026-0010.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Кротов Е.А. Шумы в системах формирования и регистрации оптических изображений / Е.А. Кротов // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах: сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции. — Москва: Экспертно-аналитический центр, 2025. — С. 64–73.
2. Антонушкина С.Д. Исследование методов пространственной фильтрации изображения / С.Д. Антонушкина, Г.В. Овечкин, Т.А. Осипова // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвузовский сборник научных трудов. — Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2024. — С. 4–12.
3. Белоусова Ю.С. Метод фильтрации высокочастотных помех с сохранением границ объектов / Ю.С. Белоусова // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: сборник статей II Всероссийской научной конференции. — Москва: КДУ, 2023. — С. 181–186.
4. Бардин Б.В. Быстрый алгоритм медианной фильтрации / Б.В. Бардин // Научное приборостроение. — Санкт-Петербург: Институт аналитического приборостроения РАН, 2011 — Т. 21. — № 3. — С. 135–139.
5. Ляхов П.А. Применение сглаживающих фильтров для очистки от шума изображений в оттенках серого / П.А. Ляхов, М.В. Валуева // Наука. Инновации. Технологии. — 2015. — № 3. — С. 37–50.
6. Красковский П.Н. Алгоритмы растеризации, применяемые для отрисовки игровых приложений на мобильных устройствах / П.Н. Красковский // Компьютерные системы и сети: материалы 53-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. — Минск, 2017. — С. 92–93.
7. Борисова И.В. Применение вейвлет-преобразования для слияния многоспектральных изображений / И.В. Борисова // Компьютерная оптика. — 2020. — Т. 44. — № 2. — С. 259–265. — DOI: 10.18287/2412-6179-CO-592.
8. Муравьева О.В. Метод главных компонент при обработке многопараметровых акустических сигналов зеркально-теневым методом контроля проката / О.В. Муравьева, В.А. Тенев, А.Ф. Брестер [и др.] // Автометрия. — 2023. — Т. 59. — № 5. — С. 3–14. — DOI: 10.15372/AUT20230501.
9. Кесарева Е.Д. Анизотропная диффузия в задачах шумоподавления / Е.Д. Кесарева // Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. — Тамбов: Консалтинговая компания Юком, 2015. — С. 99–101.
10. Юркевичус С.П. Разработка новых оптических методов исследования потоков жидкости и газа на кафедре физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ» / С.П. Юркевичус, Б.С. Ринкевичус // Инноватика и экспертиза: научные труды. — 2015. — № 2 (15). — С. 288–292.
11. Скорнякова Н.М. Визуализация обтекания шероховатых поверхностей методом анемометрии по изображениям частиц / Н.М. Скорнякова, Т. Вин, О.А. Евтихьева [и др.] // Естественные и технические науки. — Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2018. — № 12. — С. 321–325. — DOI: 10.25633/ETN.2018.12.06.
12. Варфоломеев М.А. Моделирование методом DSMC течения разреженного газа в элементах вакуумного трубопровода / М.А. Варфоломеев, Н.Г. Быков // Vacuum. — 2020. — Т. 175. — С. 109345.
13. Заявка на патент № 2025134226 Российская Федерация. Установка для исследования обтекания поверхностей потоком воздуха в разреженных средах / С.С. Дегоян, Н.М. Скорнякова, Д.Ф. Софуев, Д.А. Черных. — Заявл. 04.12.2025.
14. Софуев Д.В. Программа для автоматизированной обработки поля скоростей в разреженных условиях методом видеорегистрации изображений разреженных потоков: программа для ЭВМ / Д.В. Софуев, Н.М. Скорнякова, С.С. Дегоян. — Москва: МЭИ, 2024.



15. Win T. Visualization of a Flow around the Surface with Different Roughness Coefficients / T. Win, D.V. Ilin, N.M. Skornyakova // Scientific Visualization. — 2021. — Vol. 13. — № 3. — P. 93–104. — DOI: 10.26583/sv.13.3.10.
16. Карнаухов В.Н. Быстрый алгоритм фильтра нелокального среднего, основанный на рекурсивном вычислении весов сходства / В.Н. Карнаухов, М.Г. Мозеров // Математические модели, вычислительные методы. Информационные процессы. — Институт проблем передачи информации РАН, 2018. — Т. 18. — № 2. — С. 81–85.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Krotov Ye.A. Shumi v sistemakh formirovaniya i registratsii opticheskikh izobrazhenii [Noise in optical image formation and recording systems] / Ye.A. Krotov // Tekhnologii polucheniya i obrabotki informatsii o dinamicheskikh obektakh i sistemakh: sbornik materialov VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Technologies for Acquiring and Processing Information on Dynamic Objects and Systems: Proceedings of the 6th All-Russian Scientific and Practical Conference]. — Moscow: Expert and Analytical Centre, 2025. — P. 64–73. [in Russian]
2. Antonushkina S.D. Issledovanie metodov prostranstvennoi filtratsii izobrazheniya [A study of spatial image filtering methods] / S.D. Antonushkina, G.V. Ovechkin, T.A. Osipova // Matematicheskoe i programmnoe obespechenie vychislitelnykh sistem: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov [Mathematical and Software Support for Computing Systems: Inter-university Collection of Scientific Papers]. — Ryazan: V.F. Utkin Ryazan State University of Radio Engineering, 2024. — P. 4–12. [in Russian]
3. Belousova Yu.S. Metod filtratsii visokochastotnykh pomekh s sokhraneniem granits obektov [A method for filtering high-frequency interference while preserving object boundaries] / Yu.S. Belousova // Iskusstvennyi intellekt v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya i obrabotki dannykh: sbornik statei II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii [Artificial Intelligence in Automated Control and Data Processing Systems: Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific Conference]. — Moscow: KDU, 2023. — P. 181–186. [in Russian]
4. Bardin B.V. Bistrii algoritm mediannoi filtratsii [A fast median filtering algorithm] / B.V. Bardin // Nauchnoe priborostroenie [Scientific instrumentation]. — St Petersburg: Institute of Analytical Instrumentation, Russian Academy of Sciences, 2011 — Vol. 21. — № 3. — P. 135–139. [in Russian]
5. Lyakhov P.A. Primenenie sglazhivayushchikh filtrov dlya ochistki ot shuma izobrazhenii v ottenkakh serogo [The use of smoothing filters for noise reduction in greyscale images] / P.A. Lyakhov, M.V. Valueva // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii [Science. Innovation. Technology]. — 2015. — № 3. — P. 37–50. [in Russian]
6. Kraskovskii P.N. Algoritmi rasterizatsii, primenyaemie dlya otrisovki igrovikh prilozhenii na mobilnykh ustroystvakh [Rasterisation algorithms used for rendering games on mobile devices] / P.N. Kraskovskii // Kompyuternye sistemi i seti: materialy 53-i nauchnoi konferentsii aspirantov, magistrantov i studentov, Minsk [Computer Systems and Networks: Proceedings of the 53rd Scientific Conference for Postgraduate, Master's and Undergraduate Students, Minsk] / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. — Minsk, 2017. — P. 92–93. [in Russian]
7. Borisova I.V. Primenenie veivlet-preobrazovaniya dlya sliyaniya mnogospektralnykh izobrazhenii [The use of the wavelet transform for merging multispectral images] / I.V. Borisova // Kompyuternaya optika [Computer Optics]. — 2020. — Vol. 44. — № 2. — P. 259–265. — DOI: 10.18287/2412-6179-CO-592. [in Russian]
8. Muraveva O.V. Metod glavnikh komponent pri obrabotke mnogoparametrovnykh akusticheskikh signalov zerkalno-tenevogo metoda kontrolya prokata [The principal component method in the processing of multi-parameter acoustic signals from the mirror-shadow method of rolled steel inspection] / O.V. Muraveva, V.A. Tenenev, A.F. Brester [et al.] // Avtometriya [Autometriya]. — 2023. — Vol. 59. — № 5. — P. 3–14. — DOI: 10.15372/AUT20230501. [in Russian]
9. Kesareva Ye.D. Anizotropnaya diffuziya v zadachakh shumopodavleniya [Anisotropic diffusion in noise reduction problems] / Ye.D. Kesareva // Voprosy obrazovaniya i nauki: teoreticheskii i metodicheskii aspekty: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Issues in Education and Science: Theoretical and Methodological Aspects: a collection of academic papers based on the proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. — Tambov: Yukom Consulting Company, 2015. — P. 99–101. [in Russian]
10. Yurkevichyus S.P. Razrabotka novykh opticheskikh metodov issledovaniya potokov zhidkosti i gaza na kafedre fiziki im. V.A. Fabrikanta NIU «MEI» [Development of new optical methods for studying liquid and gas flows at the V.A. Fabrikant Department of Physics, National Research University 'Moscow Power Engineering Institute'] / S.P. Yurkevichyus, B.S. Rinkevichyus // Innovatika i ekspertiza: nauchnye trudy [Innovation and Expertise: Scientific Papers]. — 2015. — № 2 (15). — P. 288–292. [in Russian]
11. Skornyakova N.M. Vizualizatsiya obtekaniya sherokhovatikh poverkhnostei metodom anemometrii po izobrazheniyam chastits [Visualisation of flow around rough surfaces using the particle-image anemometry method] / N.M. Skornyakova, T. Vin, O.A. Yevtikhieva [et al.] // Yestestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]. — National Research University 'Moscow Power Engineering Institute', 2018. — № 12. — P. 321–325. — DOI: 10.25633/ETN.2018.12.06. [in Russian]
12. Varfolomeev M.A. Modelirovanie metodom DSMC techeniya razrezhennogo gaza v elementakh vakuumnogo truboprovoda [Simulation of rarefied gas flow in vacuum pipeline elements using the DSMC method] / M.A. Varfolomeev, N.G. Bikov // Vacuum. — 2020. — Vol. 175. — P. 109345. [in Russian]
13. Zayavka na patent № 2025134226 Rossiiskaya Federatsiya. Ustanovka dlya issledovaniya obtekaniya poverkhnostei potokom vozdukh v razrezhennykh sredakh [Patent application No. 2025134226, Russian Federation. Apparatus for investigating airflow around surfaces in rarefied media] / S.S. Degoyan, N.M. Skornyakova, D.F. Sofuev, D.A. Chernikh. — Appl. 04.12.2025. [in Russian]
14. Sofuev D.V. Programma dlya avtomatizirovannoi obrabotki polya skorostei v razrezhennykh usloviyakh metodom videoregistratsii izobrazhenii razrezhennykh potokov: programma dlya EVM [A programme for the automated processing of



velocity fields in low-density conditions using the method of video recording of low-density flow images: a computer programme] / D.V. Sofuev, N.M. Skornyakova, S.S. Degoyan. — Moscow: MEI, 2024. [in Russian]

15. Win T. Visualization of a Flow around the Surface with Different Roughness Coefficients / T. Win, D.V. Ilin, N.M. Skornyakova // Scientific Visualization. — 2021. — Vol. 13. — № 3. — P. 93–104. — DOI: 10.26583/sv.13.3.10.

16. Karnaukhov V.N. Bistrii algoritm filtra nelokalnogo srednego, osnovannii na rekursivnom vichislenii vesov skhodstva [A fast non-local mean filter algorithm based on the recursive calculation of similarity weights] / V.N. Karnaukhov, M.G. Mozerov // Matematicheskie modeli, vichislitelnie metodi. Informatsionnie protsessi [Mathematical Models, Computational Methods. Information Processes]. — Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences, 2018. — Vol. 18. — № 2. — P. 81–85. [in Russian]