

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
ВЕЩЕСТВА

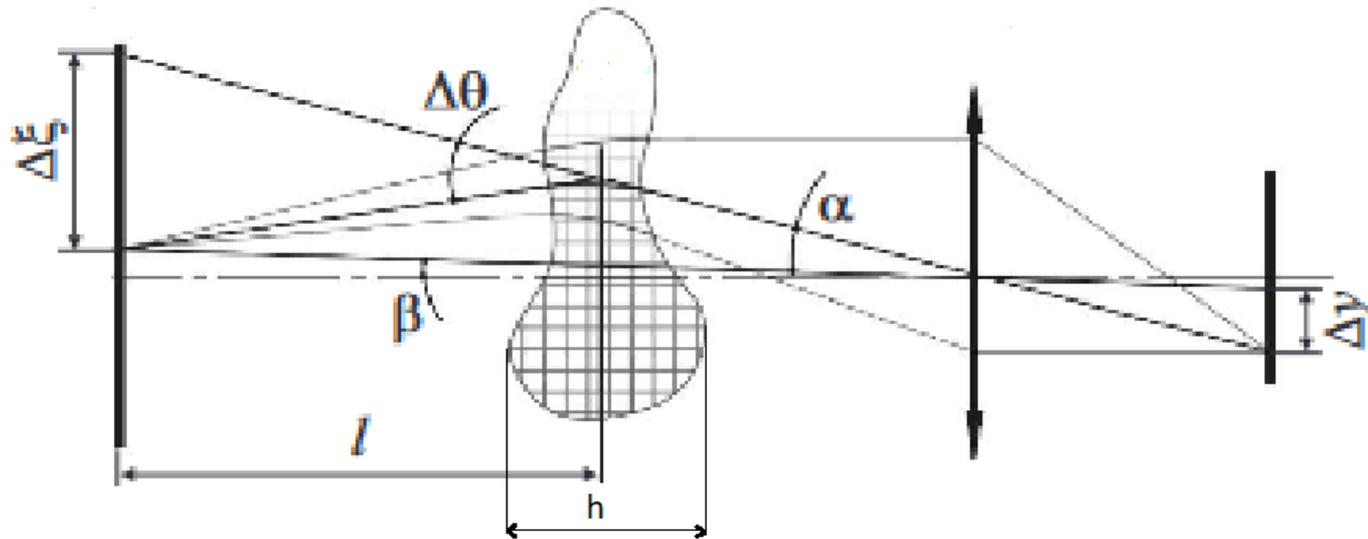
БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Повышение точности измерений теневым фоновым методом за счет использования анализа полос

Выполнил студент 404 группы
Дьячков Григорий Владимирович

Научный руководитель:
старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.
Винниченко Николай Аркадьевич

ТФМ (Теневой Фоновый Метод)



Фон

Шлирен объект

Объектив ф/ап

Матрица ф/ап

$$\Delta\theta = \int_0^s \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz,$$

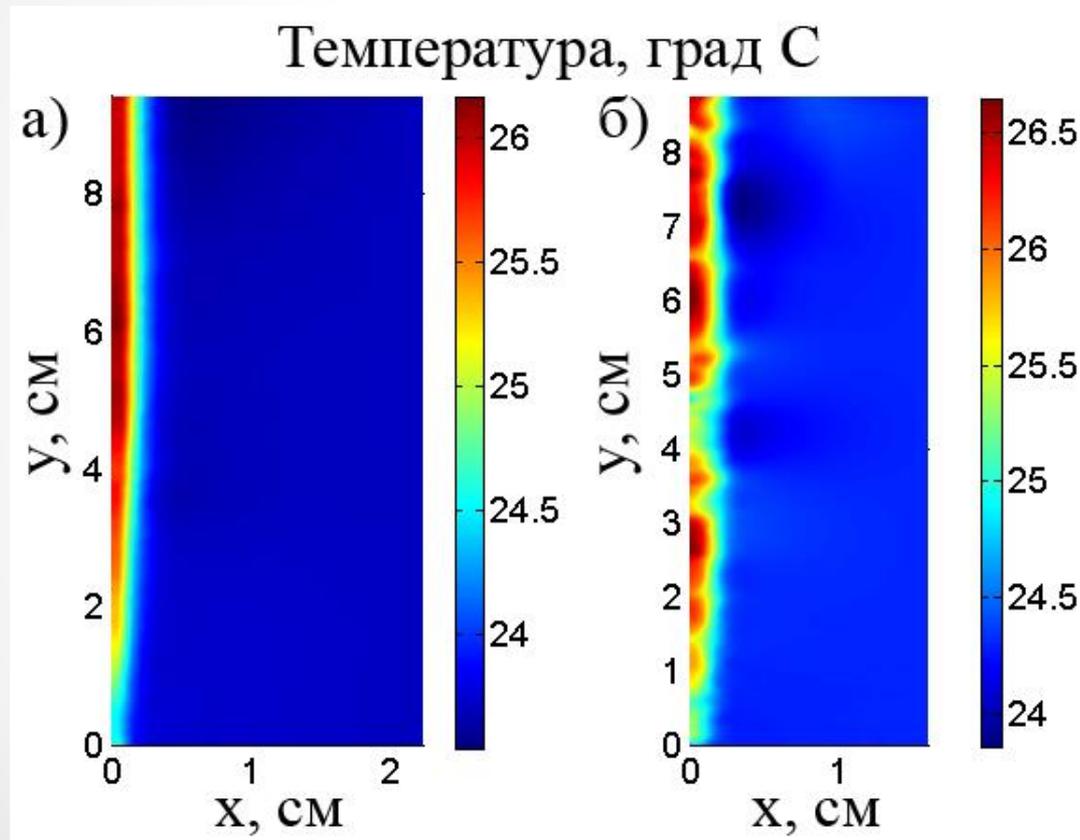
угол отклонения луча

$$\Delta\xi \approx -\Delta\theta l = -\left(\frac{\partial n}{\partial y}\right) h l$$

смещение в параксиальном приближении,
при малых углах отклонения

ТФМ в зонах большого градиента смещения.

(из дипломной работы Пуштаева А.В.)



Кросс-корреляционный метод даёт неверные значения смещения в областях с градиентом смещения больше 0.4-0.5 пикс/пикс. Вопрос об использовании альтернативных методов определения смещения актуален.

Конвекция в воде у вертикальной нагреваемой пластины

Цели

Сравнение точности и пространственного разрешения, достижимых с помощью традиционного кросс-корреляционного ТФМ и Фурье метода.

Поиск оптимальных параметров фона, исследование возможных ограничений фонов и Фурье метода для уменьшения погрешности измерений.

Проверка возможностей Фурье метода с помощью синтетических изображений, соответствующих расчетным распределениям показателя преломления в реальных течениях, а также изображений, полученных в ходе реального эксперимента.

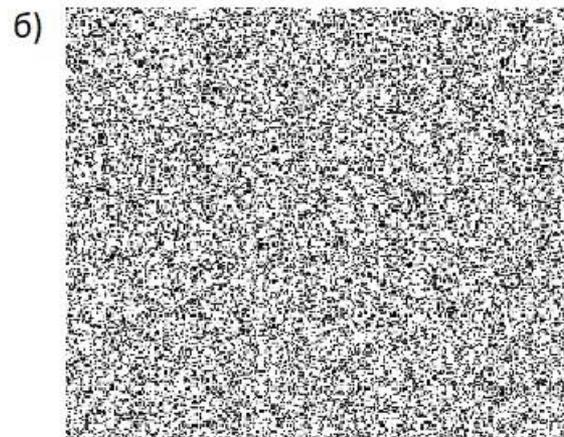
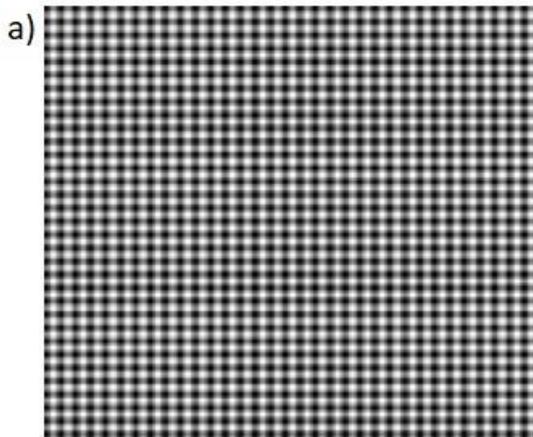
Описание Фурье метода

$$I_1(x, y) = a_0(x, y) + b_0(x, y)(\cos(2\pi f_{0x}x) + \cos(2\pi f_{0y}y))$$

опорный снимок

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y)(\cos(2\pi f_{0x}(x + \xi_x(x, y))) + \cos(2\pi f_{0y}(y + \xi_y(x, y)))) = \\ = a(x, y) + b(x, y)(\cos(2\pi f_{0x}x + \Delta\varphi_x(x, y)) + \cos(2\pi f_{0y}y + \Delta\varphi_y(x, y)))$$

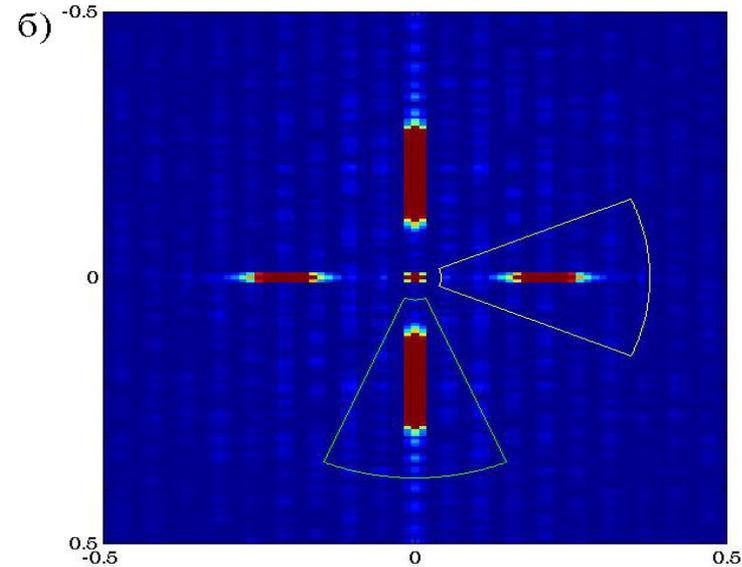
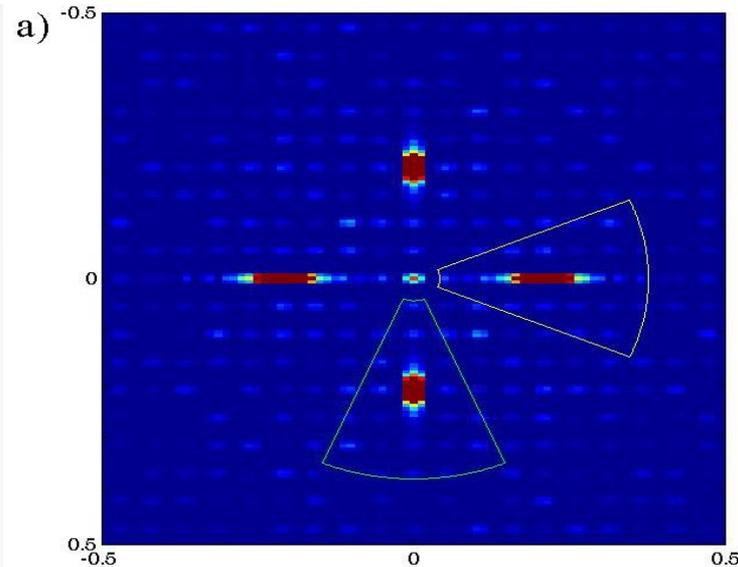
рабочий снимок



а) Фурье-фон и б) хаотический фон
для кросс-корреляции

Преобразование Фурье

$$F(I_1) = A_1(f_x, f_y) + B_1(f_x - f_{0x}, f_y) + B_1^*(-f_x - f_{0x}, f_y) + C_1(f_x, f_y - f_{0y}) + C_1^*(f_x, -f_y - f_{0y})$$



Двумерные преобразования Фурье от а) опорного, б) рабочего изображения.

Фильтрация в фурье-плоскости и обратное преобразование Фурье

$$F^{-1}(B_1(f_x - f_0, f_y)) = g_{0x} = \frac{1}{2} b e^{i2\pi f_0 x}$$

$$F^{-1}(B_2(f_x - f_0, f_y)) = g_x = \frac{1}{2} b e^{i2\pi f_0(x + \xi_x)}$$

$$\Delta\varphi_x = 2\pi f_{0x} \xi_x = \text{Im}(\ln(g_x g_{0x}^*))$$

— может потребоваться
развёртка фазы

Тесты с помощью синтетических изображений.

Постоянные смещения

$$\delta_{\xi} = \sqrt{\langle (\xi_x - u)^2 \rangle}$$

полная погрешность смещений

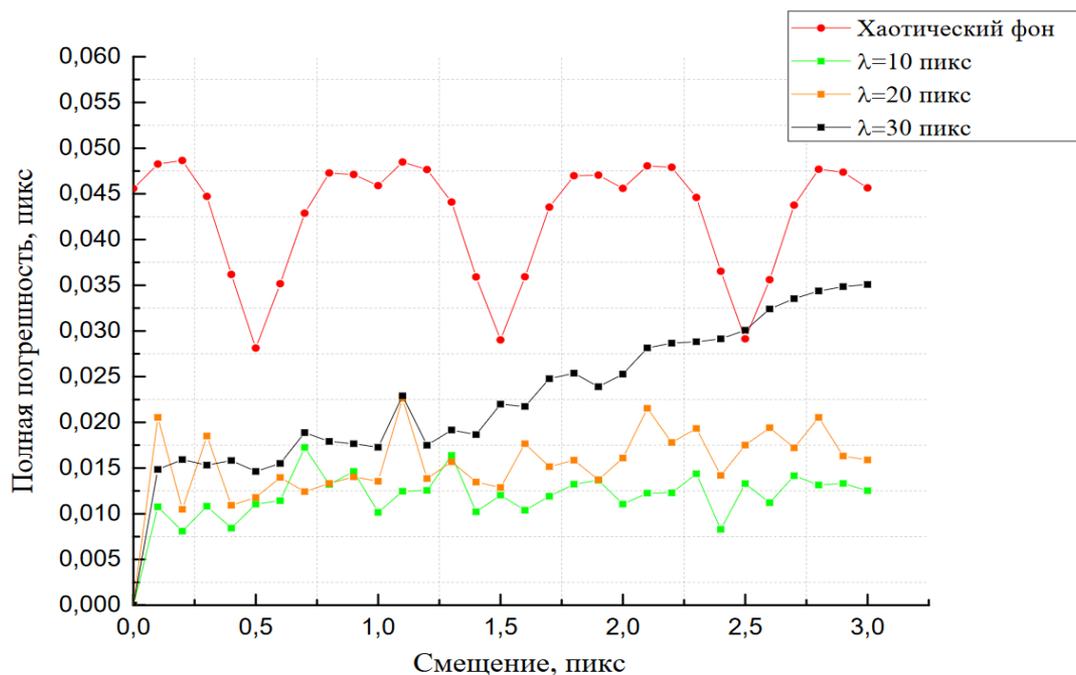


График зависимости полной погрешности от величины постоянного смещения для хаотического и Фурье-фонов с различным периодом полос

Синусоидальные смещения

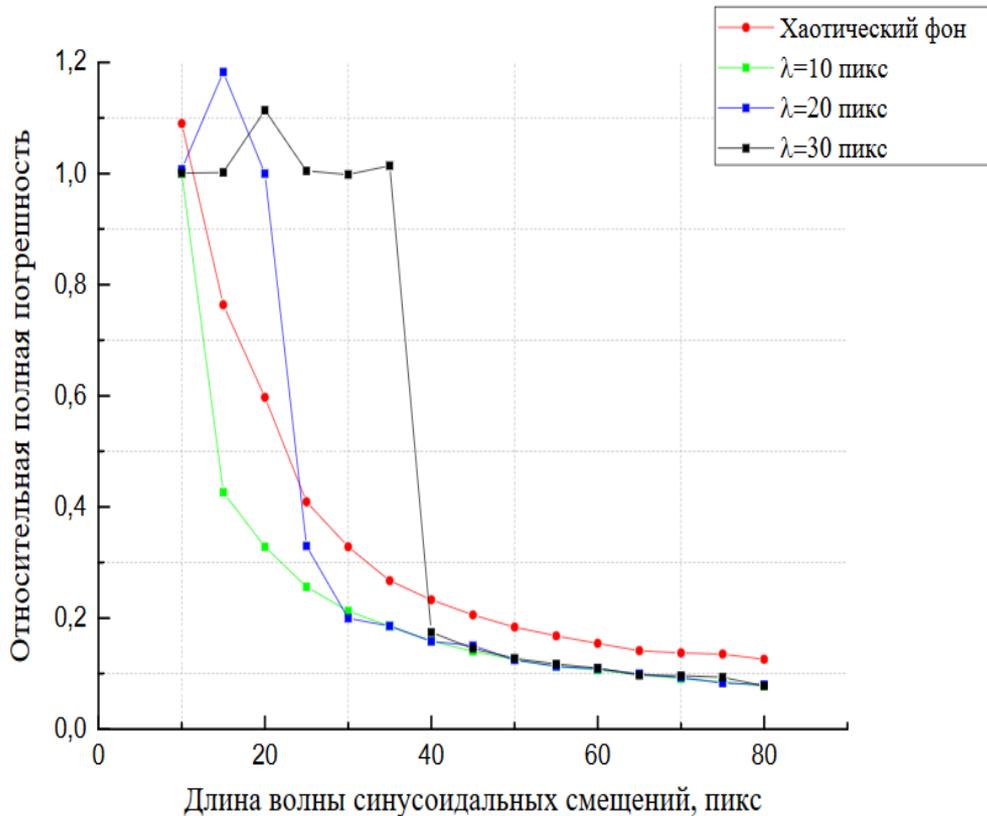
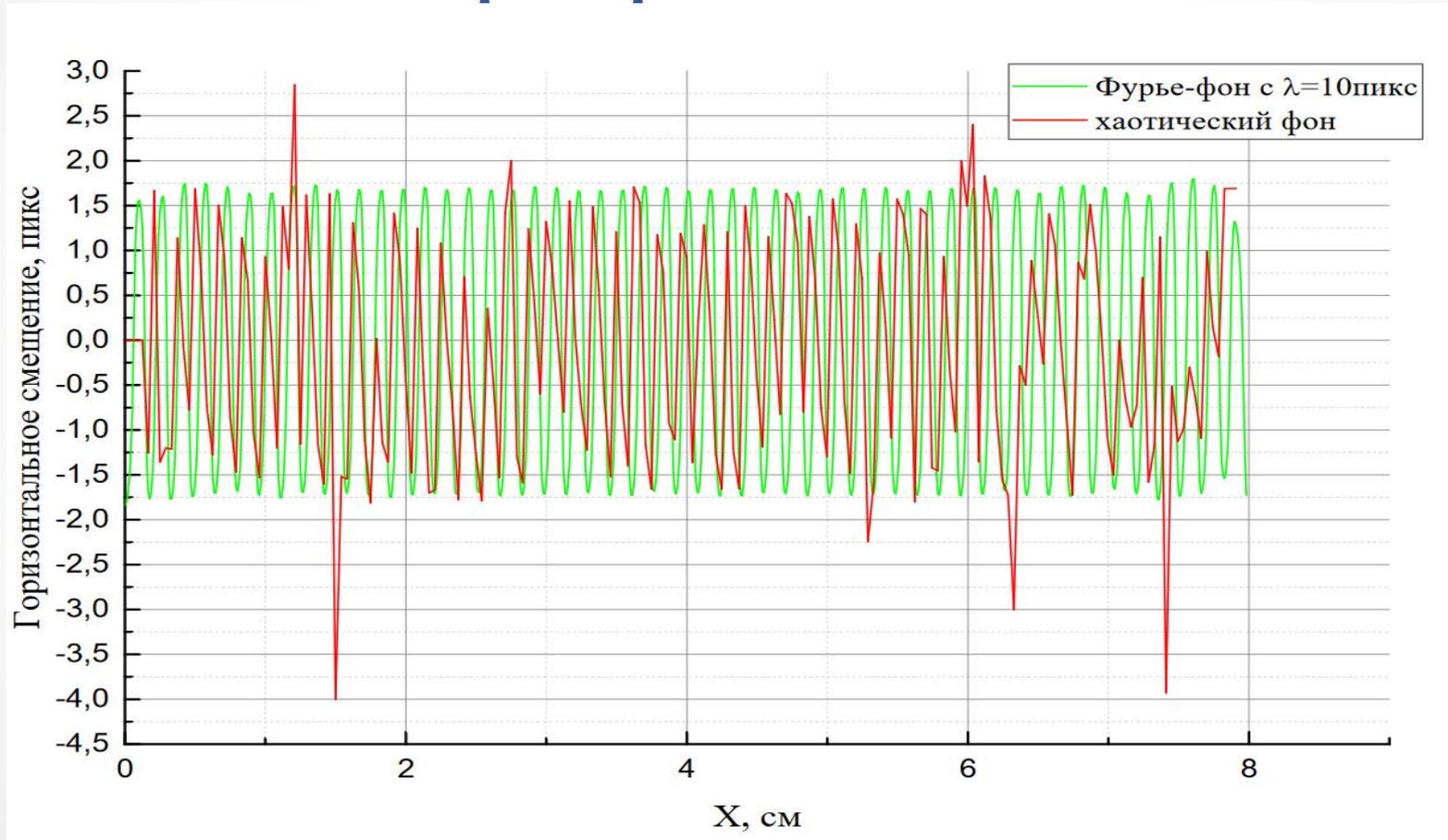


График зависимости полной погрешности от длины волны синусоидальных смещений для хаотического и Фурье-фон с различным периодом полос

Тип фона	Длина волны возмущений λ_d для 50% погрешности (пикс)	Макс. градиент смещения (пикс/пикс)	$\frac{\lambda_d}{\lambda}$
Хаот. фон	22 пикс.	0.57	-
$\lambda=10$ пикс.	14 пикс.	0.9	1.4
$\lambda=20$ пикс.	24 пикс.	0.52	1.2
$\lambda=30$ пикс.	38 пикс.	0.33	1.26

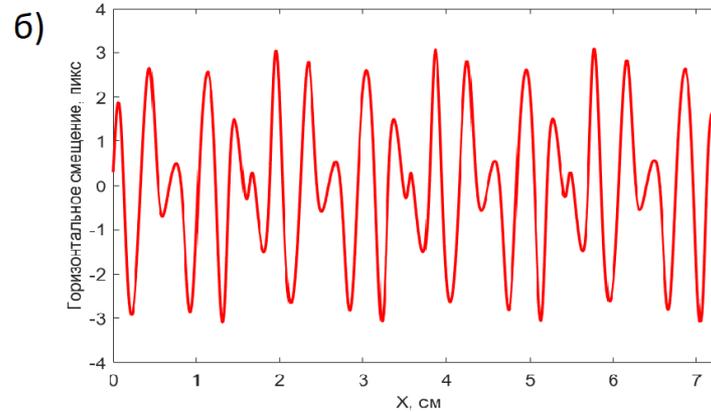
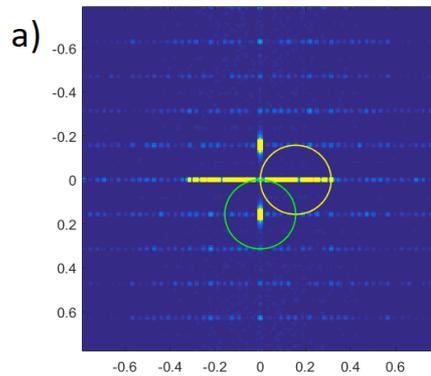
Неплохо выполняется ограничение $\lambda_d > \sqrt{2}\lambda$ на разрешение полей возмущений данными фонами

Лучшее пространственное разрешение

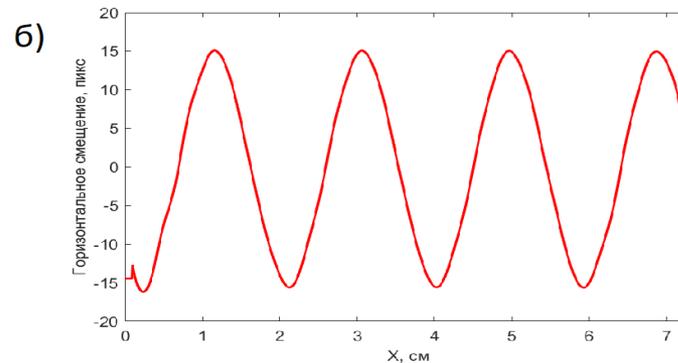
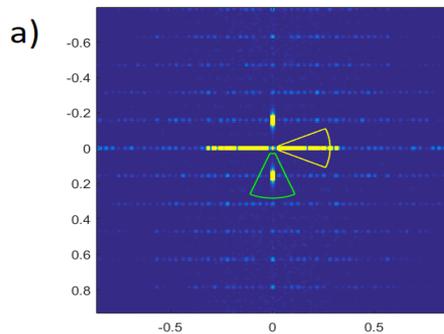


Обработка изображения с синусоидальным профилем смещения с амплитудой 2 пикс и периодом 15 пикс двумя методами

Выбор параметров фильтра

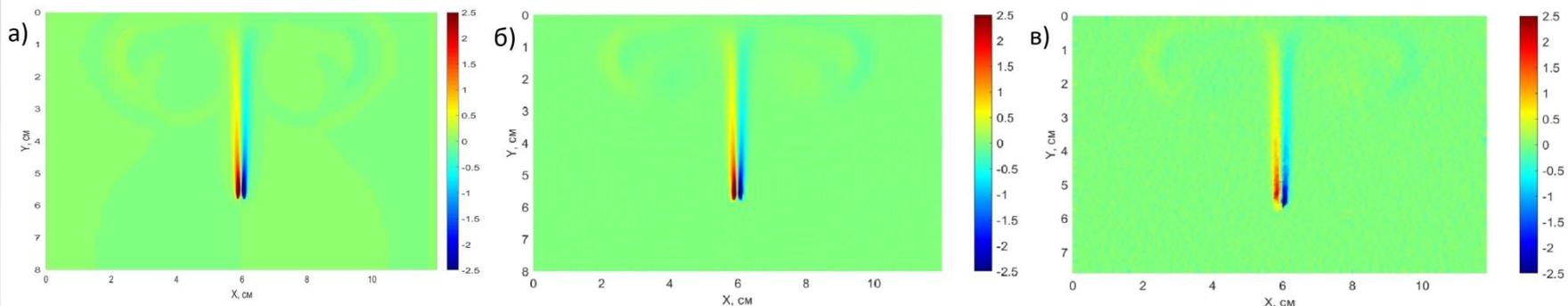


- а) Двумерное преобразование Фурье с использованием круговых фильтров
б) одномерный профиль горизонтальных синусоидальных смещений

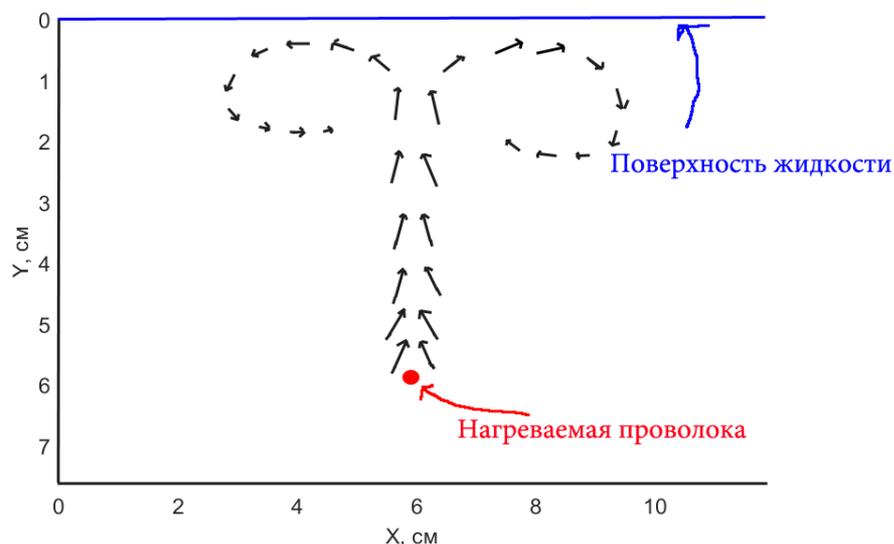
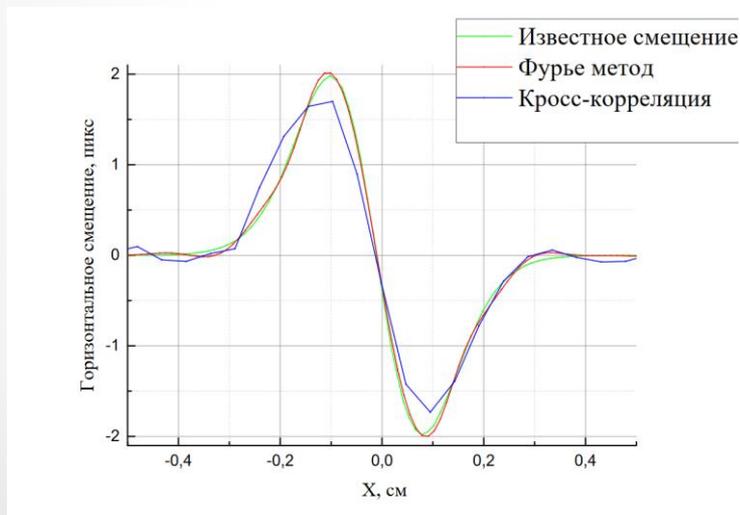


- а) Двумерное преобразование Фурье с использованием секторальных фильтров.
б) одномерный профиль горизонтальных синусоидальных смещений

Моделирование реальных течений. Конвективная струя. Сравнение смещений



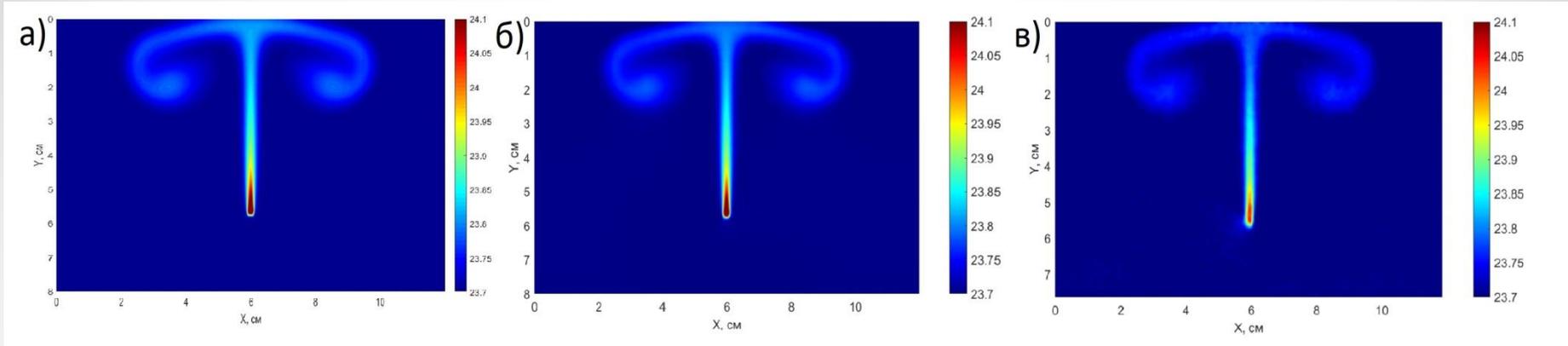
Двумерные поля горизонтальных смещений (пикс): а) истинное б) определенное с помощью Фурье метода в) определенное с помощью кросс-корреляции



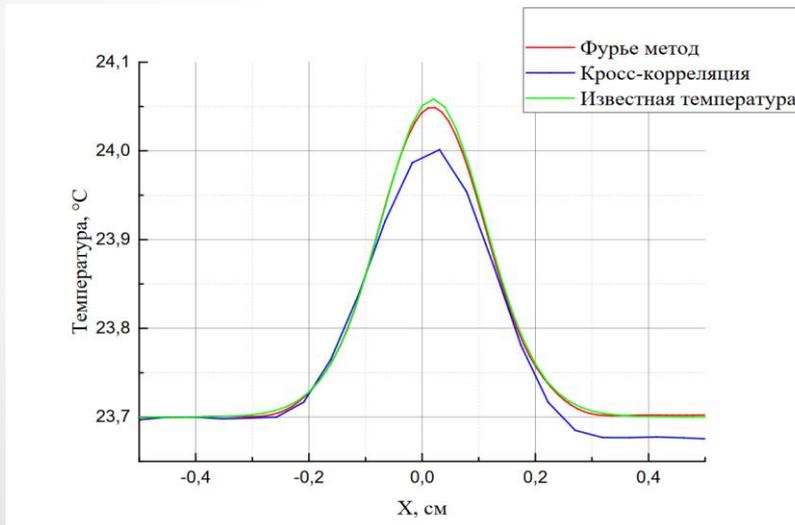
Профили горизонтальных смещений
(пикс) глубина $y=5$ см

Схема течения

Конвективная струя. Сравнение температур



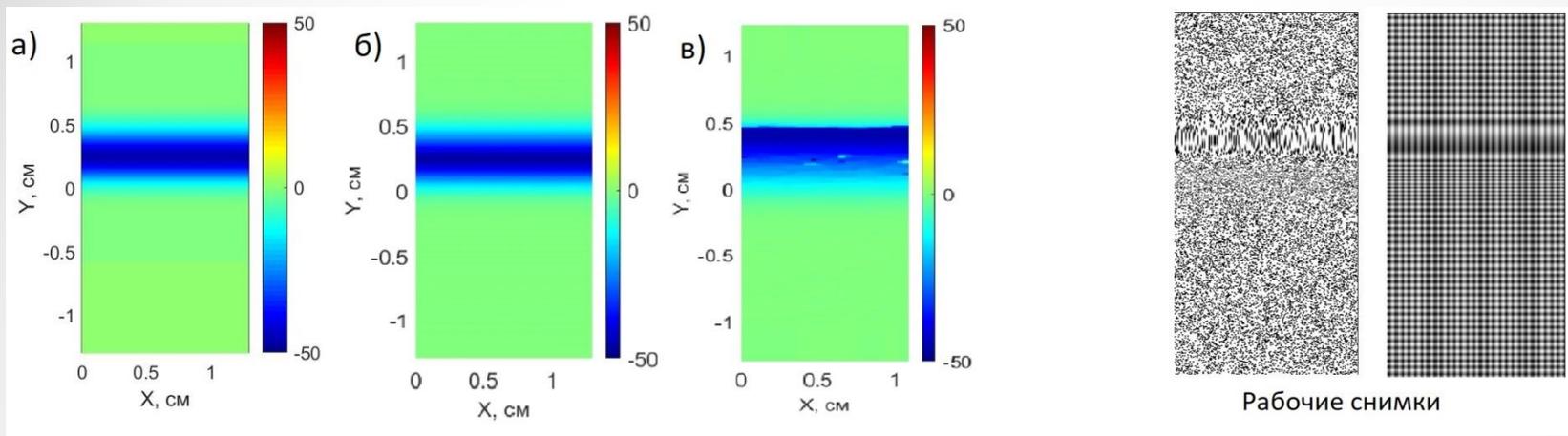
Двумерные поля температур ($^{\circ}\text{C}$): а) истинное б) определенное с помощью Фурье метода в) определенное с помощью кросс-корреляции



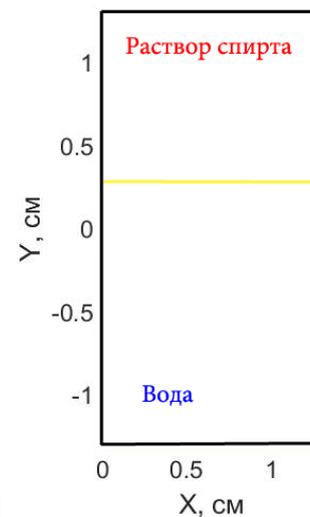
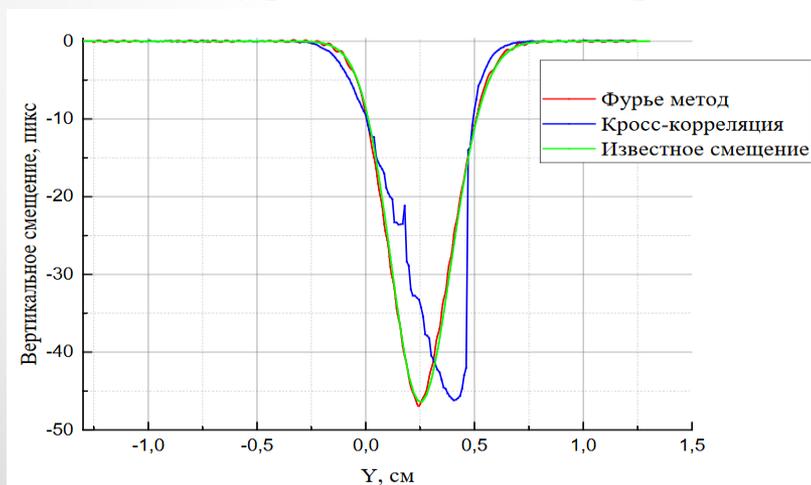
Занижение пикового значения смещения кросс-корреляционным методом приводит к занижению максимальной температуры

Горизонтальные профили температуры ($^{\circ}\text{C}$) глубина $y=5$ см

Диффузионный слой в водно-спиртовом растворе. Сравнение смещений



Двумерные поля вертикальных смещений (пикс): а) истинное б) определенное с помощью Фурье метода в) определенное с помощью кросс-корреляции.

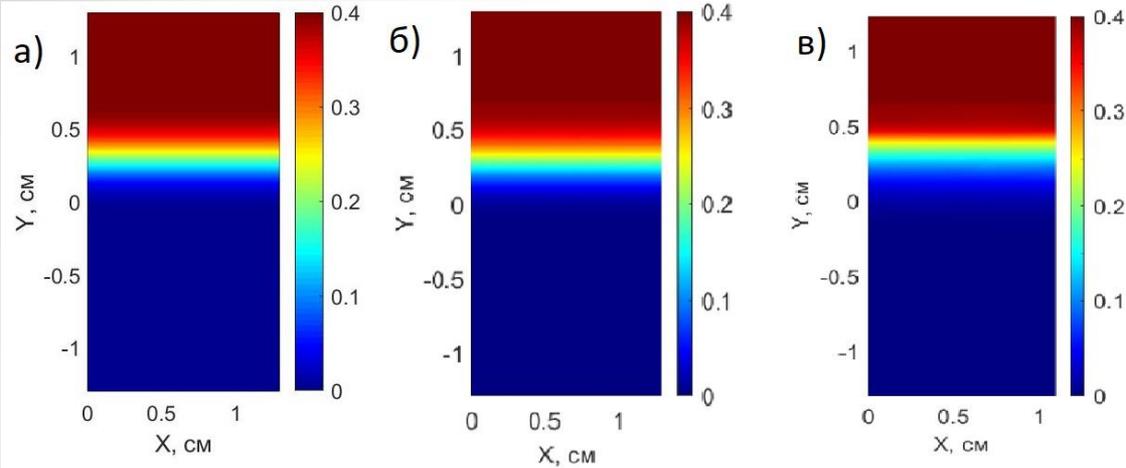


Профили

вертикальных смещений (пикс).

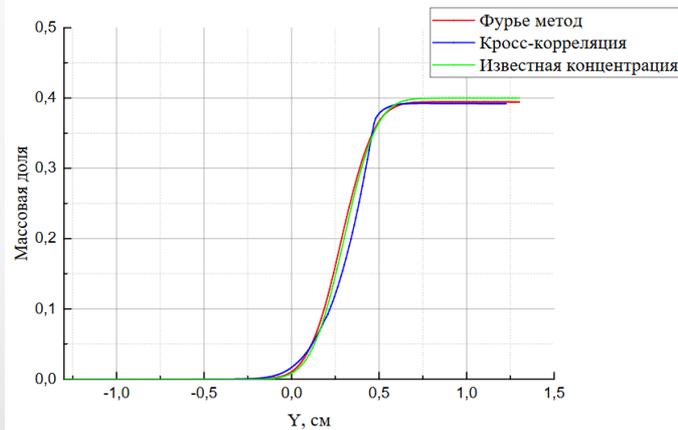
Схема эксперимента

Диффузионный слой в водно-спиртовом растворе. Сравнение массовой доли



Кривая для кросс-корреляционного метода оказывается несколько сдвинутой от известного значения массовой доли и значения, найденного Фурье методом.

Двумерные поля массовой доли спирта: а) истинное б) определенное с помощью Фурье метода в) определенное с помощью кросс-корреляции

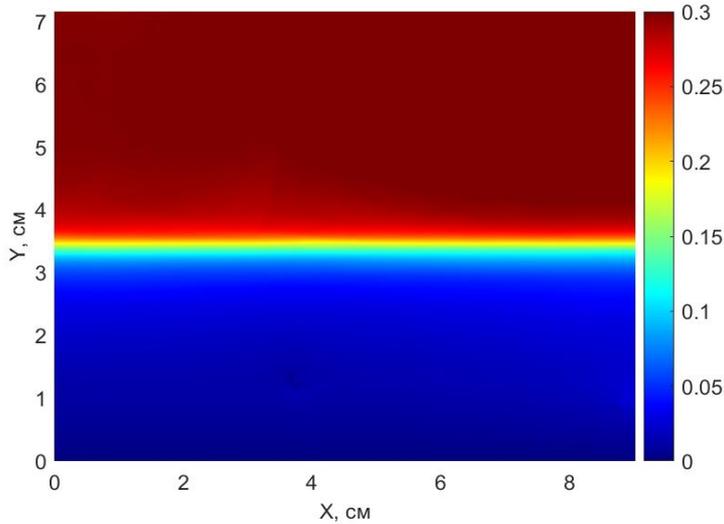


Видно, что в слое, где непосредственно происходит диффузия, кривая для кросс-корреляционного метода оказывается несколько сдвинутой от известного смещения и смещения, найденного Фурье методом.

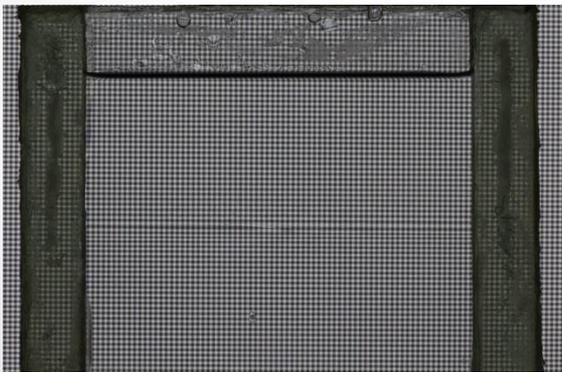
Вертикальные профили массовой доли спирта

Реальный эксперимент

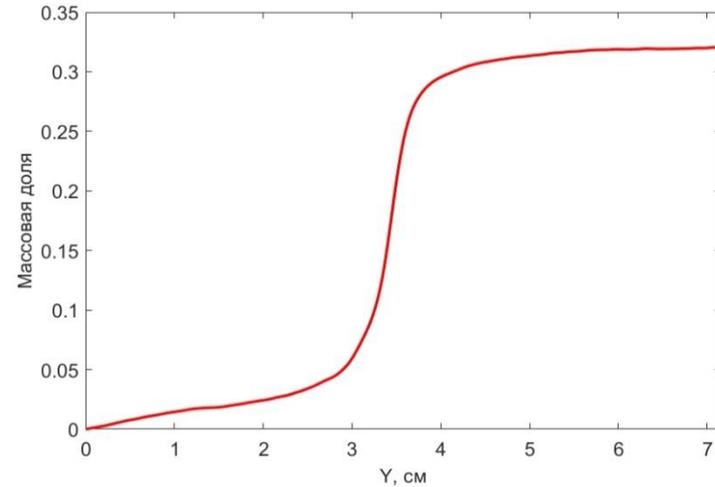
Снизу находится вода, сверху — 30%-ный раствор спирта.



Поле массовой доли спирта



Рабочий снимок эксперимента



Вертикальный профиль массовой доли спирта.

В результате Фурье обработки было получено поле массовой доли спирта. Полученная массовая доля спирта вверху при этом близка к 0.3, что соответствует налитому раствору, это также хорошо видно на одномерном вертикальном профиле

Основные результаты и выводы

- В работе был реализован и протестирован способ определения смещений в теневом фоновом методе, основанный на использовании Фурье-фонов и Фурье-обработки. Тесты на изображениях с постоянным смещением показали, что погрешность определения смещения в новом варианте метода составляет от 0.01 до 0.03 пикс, тогда как в многопроходном кросс-корреляционном методе — от 0.03 до 0.05 пикс. Главное преимущество нового метода заключается в гораздо лучшем пространственном разрешении. Было показано, что для фона с периодом полос 10 пикс возможны достоверные измерения смещений с периодом 13 пикс (для кросс-корреляционной обработки — 22 пикс).
- Проведенные тесты показали, что Фурье метод позволяет получить достоверные значения смещения в областях с градиентами смещения до 1 пикс/пикс — в отличие от кросс-корреляции, которая начинает выдавать неправильные значения уже при 0.4-0.5 пикс/пикс.
- Особенностью Фурье метода является важность выбора формы фильтра в Фурье-плоскости, а также необходимость развертки фазы в случае, если максимальное смещение превышает половину периода фона. При использовании надежного алгоритма развертки фазы рекомендуется выбирать как можно более высокочастотный фон. В условиях реального эксперимента выбор фона и точность измерений могут быть обусловлены имеющимся оборудованием (разрешением монитора, на котором отображается фон, и нелинейностью аппаратной функции системы монитор-фотокамера).
-