

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

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

Москва

2020

Содержание

1	Введение	3
2	Описание метода	4
3	Тесты с помощью синтетических изображений.....	6
4	Тесты при малых смещениях	8
5	Развёртывание фазы	9
6	Тесты при больших смещениях	11
7	Выбор параметров Фурье-фильтр.....	13
8	Моделирование реальных течений	15
	8.1 Конвективное течение от нагреваемой проволоки	15
	8.2 Диффузионный слой в водно-спиртовом растворе	19
9	Реальный эксперимент	23
10	Основные результаты и выводы	25
11	Литература	26

1 Введение

Развитие цифровых методов обработки данных расширило возможности оптических методов и сделало их более удобными для экспериментального применения, а также увеличило качество и количество получаемых данных. Хорошим примером этого служит теневой фоновый метод (ТФМ), идея которого основана на сравнении снимков фонового экрана, сделанных через однородную среду и исследуемое течение с вариациями показателя преломления^[1]. Изменение показателя преломления при этом связано с температурой, плотностью среды и концентрацией примесей. Рефракционные смещения в исследуемом объекте определяются путём сравнения опорного снимка фона, сделанного через среду с постоянным показателем преломления, и снимка этого же фона, сделанного через сам объект. Обработка снимка, как правило, происходит с помощью кросс-корреляционного алгоритма, унаследованного из PIV (Particle Image Velocimetry, цифровая трассерная визуализация). В качестве фона может выступать любое изображение^[2]. Так, для кросс-корреляционного метода обработки используются фоны из хаотически расположенных пятен, однако, как и в PIV, метод не позволяет получить достоверные значения смещений в зонах, где одновременно велики и смещения, и градиенты смещений^[3]. Поэтому было предложено использовать альтернативные типы фонов, состоящие из горизонтальных и вертикальных полос, повторяющихся с заданным периодом, и метод определения смещения на основе преобразования Фурье, который был заимствован из интерферометрии^[4]. Поле смещений в данном случае связано с разностью фаз полос в двух изображениях. Целью данной работы является сравнение точности и пространственного разрешения, достижимых с помощью традиционного кросс-корреляционного ТФМ и Фурье метода, использующего двумерный периодический фон с синусоидальными изменениями яркости вдоль двух осей. Первая попытка использовать такой метод в ТФМ^[5] показала, что он повышает точность результатов в областях с большими градиентами смещения. Однако систематические исследования точности и пространственного разрешения, аналогичные принятым в PIV, проведены не были. В настоящей работе будет произведён поиск оптимальных параметров фона, исследование возможных ограничений фонов и самого метода. Для этого будут проведены тесты для синтетических изображений с заданным полем смещения — постоянным для определения точности, одномерным синусоидальным для определения пространственного разрешения — а также

для синтетических изображений, соответствующих двум реальным течениям — конвективной струе воды над нагретой проволокой и диффузии в системе вода-раствор этанола. Для диффузии будут также рассмотрены результаты обработки изображений, полученных в ходе реального эксперимента с использованием Фурье метода.

2 Описание метода

Фоном служит изображение, яркость которого синусоидально зависит от пространственных координат. Распределение яркости фона (Рис. 1) может быть представлено следующим образом

$$I_1(x, y) = a_0(x, y) + b_0(x, y)(\cos(2\pi f_{0x}x) + \cos(2\pi f_{0y}y)) \quad (1)$$

где a , b — коэффициенты, характеризующие среднюю яркость и контраст изображения, могут зависеть от координат из-за неравномерной освещенности и оптических aberrаций объектива камеры. f_{x0} , f_{y0} частоты фона по соответствующим осям.

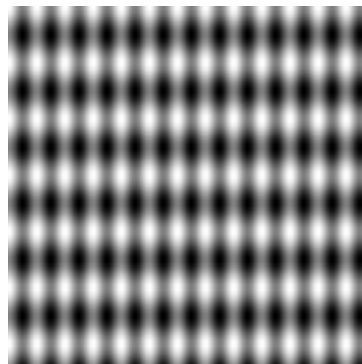


Рис. 1. Пример фонового изображения

Далее определяется яркость снимка, сделанного через исследуемый объект. Так как в неоднородной среде лучи преломляются, происходит смещение элементов фона, тогда яркость этого изображения в общем виде можно представить как

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

где $\vec{\xi} = (\xi_x, \xi_y)$ – векторное поле смещения, а $\Delta\varphi_x, \Delta\varphi_y$ – изменение фаз вертикальных и горизонтальных полос. Зная f_{x0}, f_{y0} можно определить поле смещения, найдя поле изменения фаз.

Затем вычисляется двумерное преобразование Фурье от распределения яркости для опорного и рабочего снимка.

$$G_{uvw} = \frac{1}{NM} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{M-1} I_{mn} e^{-2\pi j \left[\frac{mn}{M} + \frac{nw}{N} \right]} \quad (3)$$

Для идеального бесконечного опорного снимка преобразование Фурье бы дало образ, состоящий из четырёх дельта-функций с координатами в точках $(-f_{x0}, 0)$, $(f_{0x}, 0)$, $(0, -f_{0y})$, $(0, f_{0y})$. В опорном случае (1) образ состоит из пика вблизи нулевой частоты, связанного с медленными изменениями яркости и контраста $a(x,y)$, $b(x,y)$ и двух пар симметрично расположенных пиков вблизи f_{0x} , f_{0y} (Рис. 2а). В рабочем снимке (2) исходное высокочастотное изменение яркости промодулировано полем смещения, поэтому в преобразовании Фурье (Рис. 2б) пики расширились вдоль координатных осей. Причем расширение тем больше, чем градиент смещения вдоль данной координатной оси.

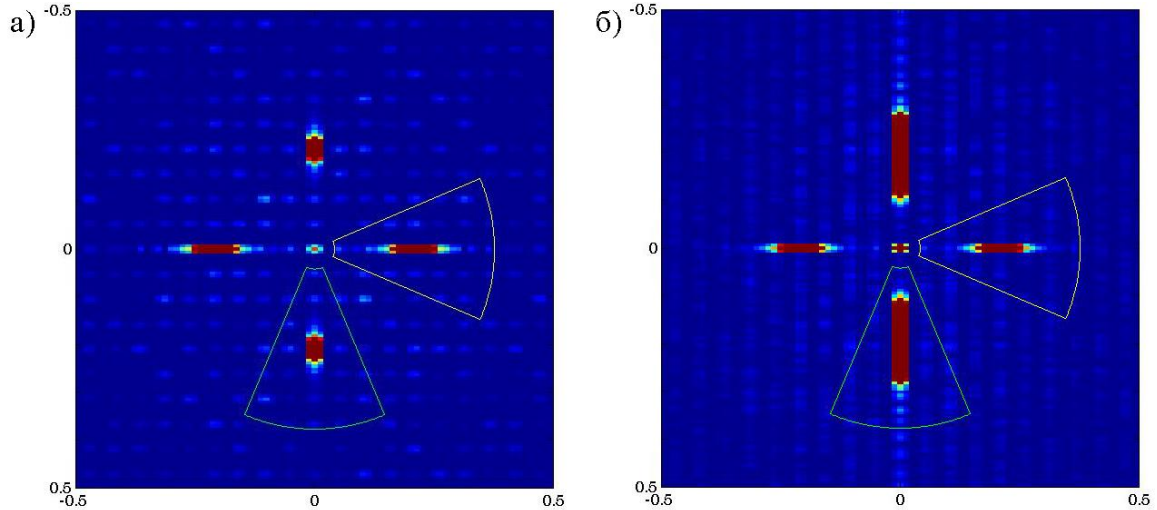


Рис. 2. Двумерные преобразования Фурье от а) опорного (1), б) рабочего (2) изображения. Задано поле смещения с большим градиентом вдоль вертикальной оси.

Преобразование Фурье от опорного снимка выражается формулой

$$F(I_1) = A_1(f_x, f_y) + B_1(f_x - f_{0x}, f_y) + B_1^*(-f_x - f_{0x}, f_y) + C_1(f_x, f_y - f_{0y}) + C_1^*(f_x, -f_y - f_{0y}) \quad (4)$$

Первый член соответствует нулевой гармонике, второй и третий — симметричным пикам вдоль горизонтальной оси, которые представляют вертикальные полосы, четвертое и пятое — симметричным пикам вдоль

вертикальной оси, которые несут информацию о горизонтальных полосах. С помощью Фурье-фильтров, показанных на Рис. 2, производится выделение пиков, значение Фурье-образа вне пика предполагается равным нулю и вычисляется обратное преобразование Фурье.

$$F^{-1}(B_1(f_x - f_0, f_y)) = g_{0x} = \frac{1}{2} b e^{i2\pi f_0 x} \quad (5)$$

Аналогично для рабочего снимка

$$F^{-1}(B_2(f_x - f_0, f_y)) = g_x = \frac{1}{2} b e^{i2\pi f_0 (x + \xi_x)} \quad (6)$$

Затем можно найти изменение фазы (неразвернутое, то есть в пределах от $-\pi$ до π) полос по обеим осям, откуда получить поле смещений $\vec{\xi} = (\xi_x, \xi_y)$

$$\Delta\varphi_x = 2\pi f_{0x} \xi_x = \text{Im}(\ln(g_x g_{0x}^*)) \quad (7)$$

Аналогично

$$\Delta\varphi_y = 2\pi f_{0y} \xi_y = \text{Im}(\ln(g_y g_{0y}^*)) \quad (8)$$

Как и в традиционном ТФМ, затем из поля смещений можно определить поле показателя преломления, решая уравнение Пуассона или переопределенную систему уравнений первого порядка. В зависимости от физической задачи, затем можно найти поля величин, связанных с показателем преломления: температуры, плотности или концентрации.

3 Тесты с помощью синтетических изображений

В работе были использованы два типа синтетических фонов: фон с синусоидально повторяющимися полосами для проверки Фурье метода и фон, содержащий хаотически расположенные пятна, для сравнения с ним кросс-корреляционного метода (Рис. 3)

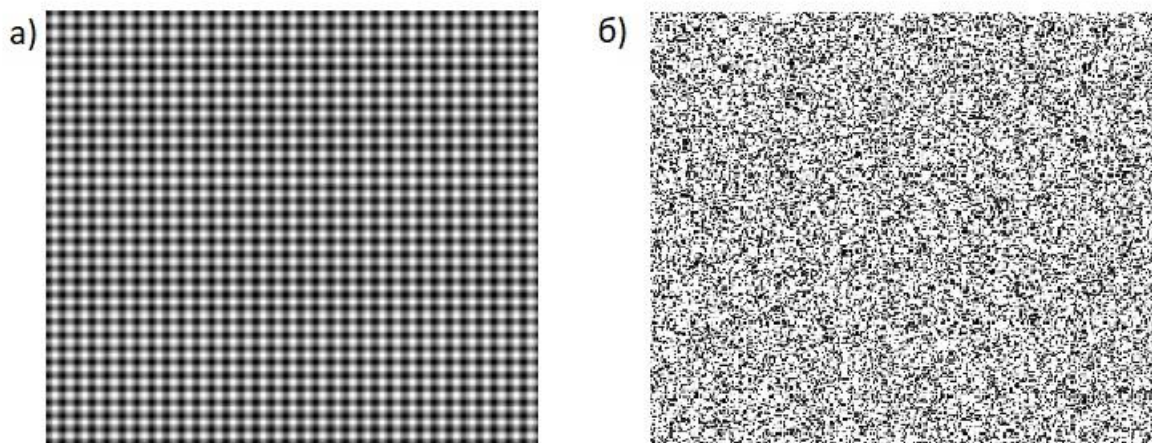


Рис. 3. Синтетическое изображение а) Фурье-фона с периодом полос 30 пикс и б) хаотического фона с размером частиц 3 пикс и плотностью засева $p=0.3$.

Выбор синтетических изображений позволяет нам заранее знать величину смещений, которые мы создадим, соответственно мы знаем точное решение заранее и можем определить точность произведенных нами измерений. Оба типа изображений имеют размер 1024x1024 пикс. Для Фурье-фонов может варьироваться период полос, а для хаотических – размер пятен и плотность p засева фона. В работе будут проведены тесты для Фурье-фонов с периодами полос $\lambda=10, 20, 30$ пикс. Для хаотических фонов предполагается, что хорошее значение точности достигается при размере пятен 3x3 пикс и плотности засева $p=0.3$ ^[6]. Фон с такими параметрами и будет использоваться при тестировании.

Для каждого из фонов создаются рабочие изображения с постоянным и синусоидальным профилями смещения вдоль горизонтальной оси. Изображения с постоянным смещением позволяют оценить точность алгоритма, изображения с синусоидальным профилем смещения – пространственное разрешение. Величина постоянного смещения пробегает значения в диапазоне от 0 до 3 пикс. Для синусоидальных смещений длина волны изменяется от 10 до 80 пикс, амплитуда $A=2$ пикс.

Далее, при обработке берётся только центральная часть изображения, чтобы избежать роста ошибки, вызванного ограничениями обоих алгоритмов на краях изображения. Полную погрешность будем считать по формуле:

$$\delta_{\xi} = \sqrt{\langle (\xi_x - u)^2 \rangle} \quad (9)$$

где ξ_x величина смещения, определённая обработчиком. u — заданное значение смещения.

4 Тесты при малых смещениях

Было изучено поведение полной погрешности смещения для изображений с постоянными полями смещений. Для хаотического фона был использован трёхпроходный кросс-корреляционный алгоритм^[7]. Получено, что при таких параметрах Фурье-обработка имеет погрешность определения смещения до 4 раз ниже в случае с фоном, период полос которого 10 пикс, по сравнению с кросс-корреляционной обработкой (Рис. 4, λ — период полос фона).

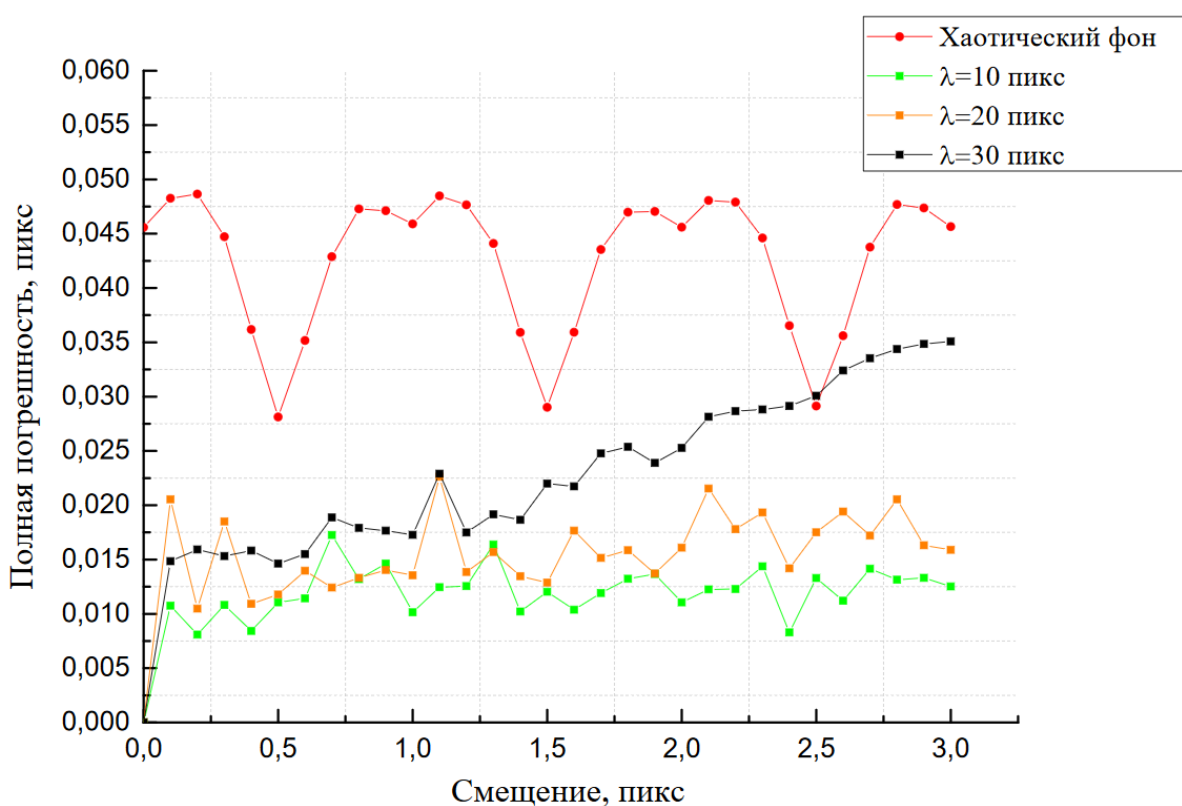


Рис. 4. График зависимости полной погрешности от величины постоянного смещения для хаотического и Фурье-фонов с различным периодом полос.

Основным преимуществом Фурье-фонов, как показывают результаты тестов для синусоидального профиля смещения (Рис. 5), является гораздо меньшая погрешность в области коротковолновых возмущений, т.е. лучшее пространственное разрешение. Для кросс-корреляционного метода относительная погрешность плавно растет и составляет 50% при λ_d около 22 пикс (λ_d — период поля смещения). Для Фурье-фонов погрешность остается сравнительно небольшой при $\lambda_d > \sqrt{2}\lambda$, что соответствует условию разрешения

поля смещения данным фоном^[8]. Соответствующая величина погрешности в 50% для фона с периодом полос $\lambda=10$ пикс достигается при λ_d около 14пикс, для фона с периодом полос $\lambda=20$ пикс при $\lambda_d=24$ пикс и для фона с $\lambda=20$ пикс при $\lambda_d=38$ пикс.

Для улучшения пространственного разрешения лучше брать фон с меньшим периодом полос. При этом в проведенных тестах для фона с $\lambda=10$ пикс при $\lambda_d=13$ пикс максимальный градиент смещения составил 0.97 пикс/пикс, что существенно превышает значения 0.4-0.5 пикс/пикс, при которых кросс-корреляционная обработка еще может давать достоверные результаты.

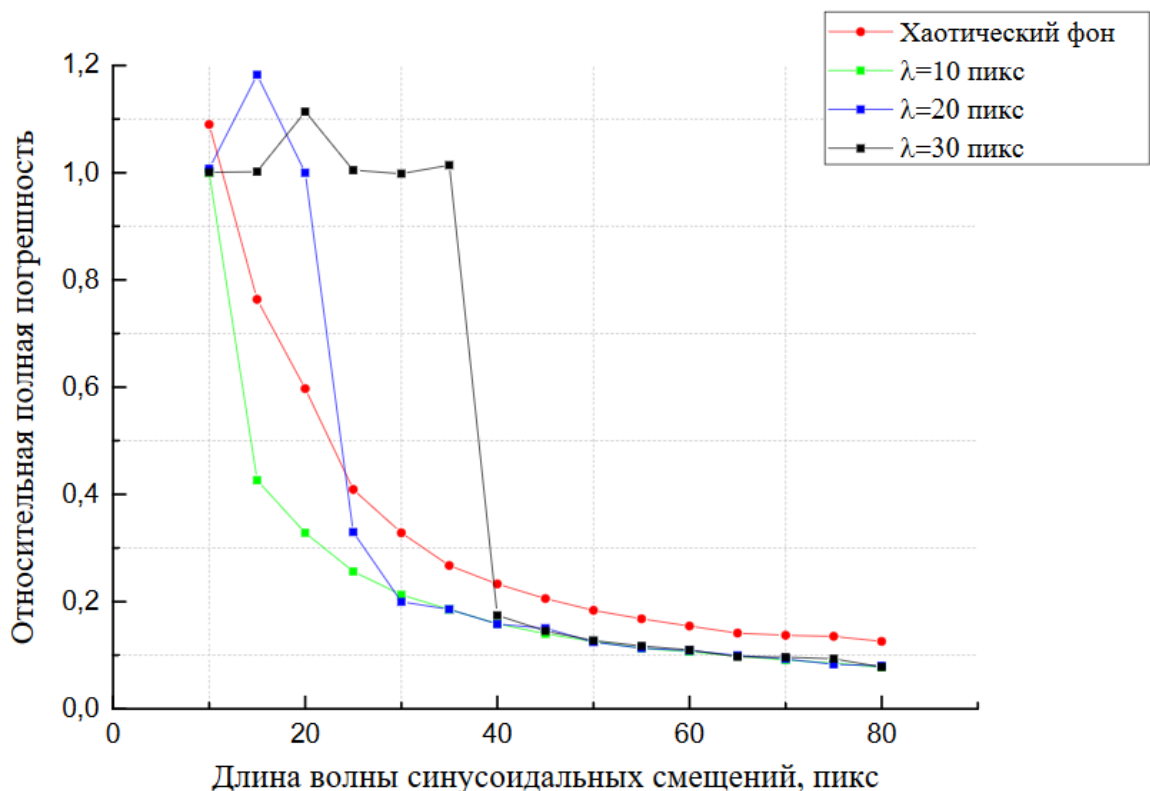


Рис. 5. График зависимости относительной полной погрешности от длины волны синусоидальных смещений для хаотического и Фурье-фонов с различным периодом полос

5 Развертывание фазы

Полученные результаты показывают, что фоны с наименьшим периодом дают наименьшую погрешность, но для больших смещений может возникнуть ситуация, в которой потребуются дополнительные вычисления, связанные с развёрткой фазы. Разности фаз, полученные в результате вычисления (7)-(8) являются неразвернутыми, т.е. имеют значения в

интервале от $-\pi$ до π . Было предложено ограничение^[8], в рамках которого развертка не требуется:

$$\frac{2\pi}{\lambda} A < \pi \quad (10)$$

где A — амплитуда смещений, λ — период полос Фурье-фона. Это требование отражает тот факт, что при величинах смещения, превышающих половину длины фона, истинное значение изменения фазы не может быть точно определено, если не использовать информацию о смещениях в соседних точках. Для его поиска используют алгоритмы развёртывания фазы, которые ликвидируют пространственные скачки, характерные для неразвернутой фазы (phase unwrapping). Однако использование таких алгоритмов при обработке сильно зашумленных реальных изображений, возможно, приведёт к ошибке.

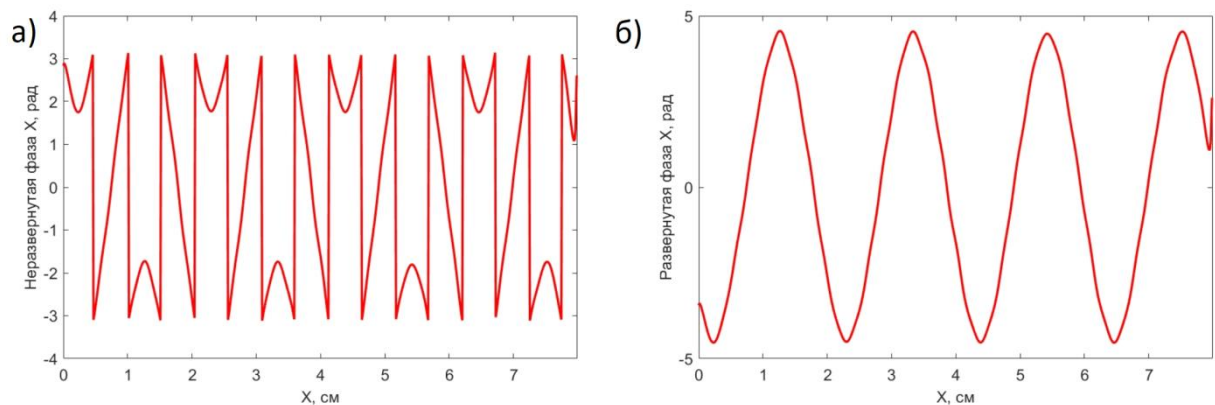


Рис. 6. Графики а) неразвернутой фазы б) развернутой фазы в случае определения синусоидальных смещений

В данном случае, на Рис. 6 представлен результат обработки синусоидального смещения с амплитудой 21 пикс и длиной волны 200 пикс. Период полос Фурье-фона составляет 30 пикс. Соответственно, ограничение (10) нарушается и в случае а) наблюдается неправильно определенная фаза, что впоследствии ведет к неправильному определению смещений, пропорциональных фазе. В случае б) применяется алгоритм развёртывания фазы, восстанавливающий верный результат. Как видно, алгоритм развёртывания даёт верный результат, позволяющий впоследствии получить правильные смещения.

Таким образом, алгоритм развёртки фазы является хорошо работающей частью метода, однако в случае возникновения ошибок, связанных с ней, можно использовать фон с периодом полос,

удовлетворяющим условию (10). Далее в работе определяется влияние развертки фазы на погрешность. Будут построены графики постоянного и синусоидального смещений для различных Фурье-фонов без использования развертки.

6 Тесты при больших смещениях

На Рис. 4 погрешность для фона с периодом полос $\lambda=30$ пикс растёт пропорционально смещению. Если увеличить величину постоянных смещений и оценить погрешность, можно получить следующие результаты для фонов с разными периодами.

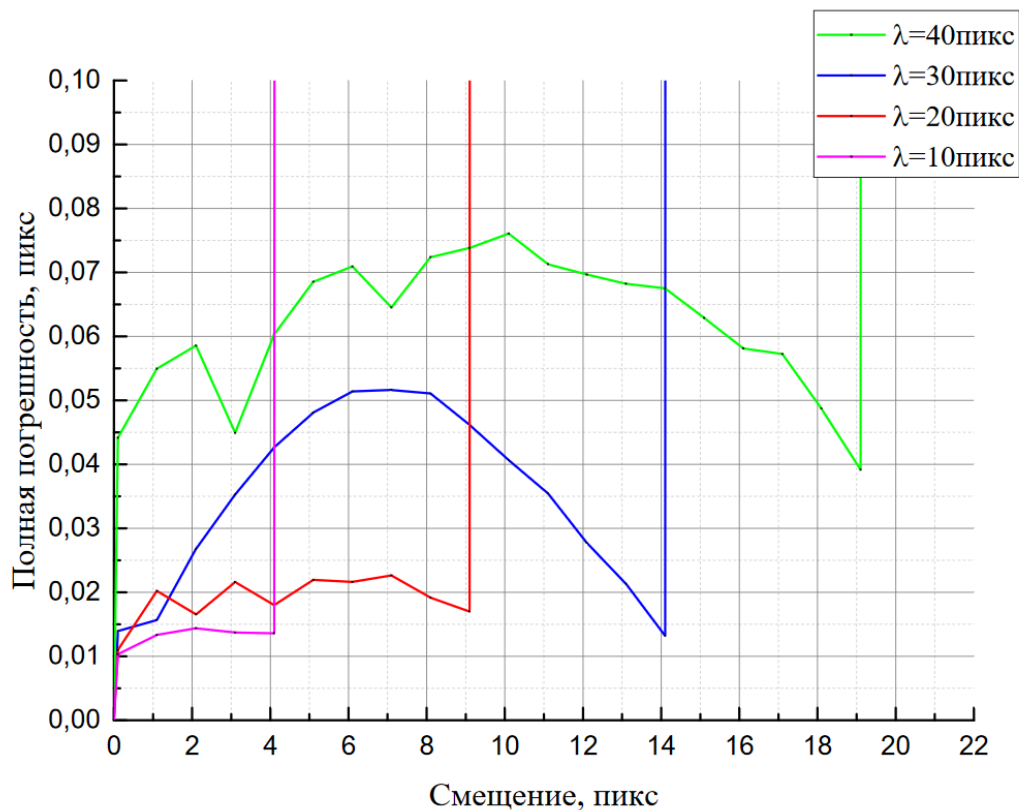


Рис. 7. График зависимости полной погрешности от величины постоянного смещения Фурье-фонов с различным периодом полос без использования развёртки фазы

На Рис. 7 видно, что полная погрешность растёт до достижения значений смещения порядка $\frac{\lambda}{4}$, достигает своего максимума, а затем монотонно убывает и при достижении величины $\frac{\lambda}{2}$, испытывает резкий скачок, равный примерно длине волны фона. Это свидетельствует о наличии четкой границы, обусловленной развёрткой фазы из ограничения (10).

Далее, аналогичные тесты проводятся для синусоидальных смещений. Амплитуда смещений выбирается в диапазоне от 0 до 35 пикс, длина волны фиксирована — 200 пикс, чтобы не превышать пространственное разрешение 1 пикс/пикс. Фоны выбираются с периодами полос $\lambda = 20, 30, 40$ пикс

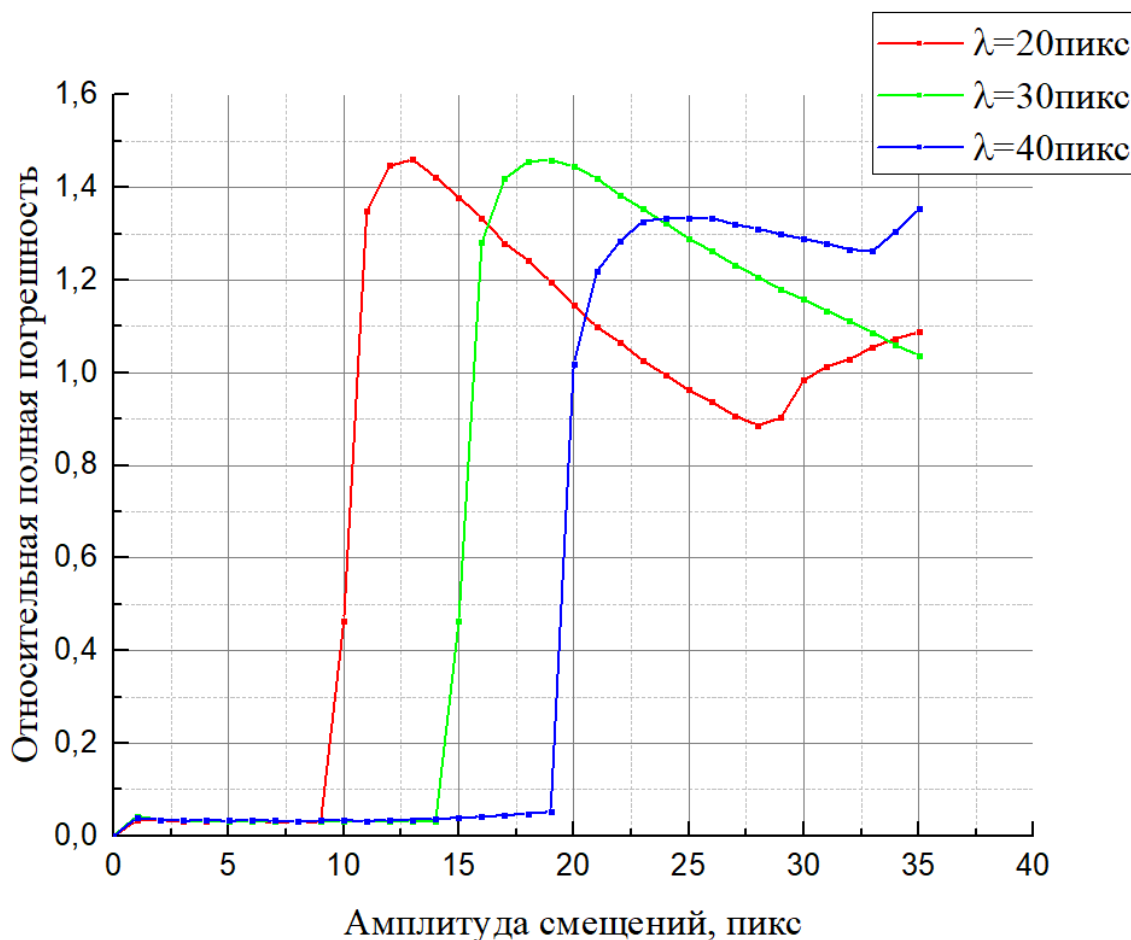


Рис. 8. График зависимости относительной полной погрешности от амплитуды синусоидальных смещений Фурье-фонов с различным периодом полос без использования развёртки фазы.

Результаты аналогичны случаю с постоянными смещениями, значение погрешности испытывает резкий скачок при достижении амплитуды смещений $\frac{\lambda}{2}$. После пересечения этой границы требуется развёртка, а в случае, если ошибка алгоритма в этом случае велика, можно взять фон с большим периодом.

Таким образом, как говорилось ранее, при достижении ограничения (10) требуется использовать развёртывание фазы, иначе погрешность измерений испытывает резкий скачок. В случае, если возникает погрешность,

связанная с развёрткой, например, на зашумленных изображениях, следует использовать фон, удовлетворяющий (10).

7 Выбор параметров Фурье-фильтра

Важную роль в процессе обработки также играет выбор параметров фильтра в Фурье-плоскости. В реальном эксперименте, помимо нулевой гармоники и четырёх пиков, из-за нелинейной аппаратной функции камеры и экрана, на котором демонстрируется фон, Фурье-образ также содержит пики, соответствующие обертонам частот фона. Чтобы верно определить смещение, требуется отсечь эти пики. Задачей является включить внутрь фильтра максимум информации, относящейся к расширившемуся в рабочем снимке основному пику, но при этом исключить области, относящиеся к остальным пикам. Было предложено^[8] использование круговых фильтров.

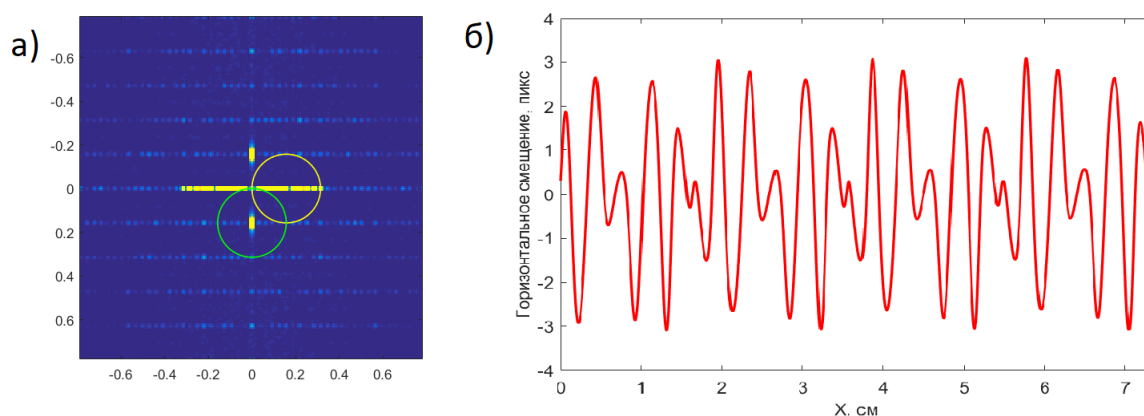


Рис. 9. а) Двумерное преобразование Фурье с использованием круговых фильтров.
б) одномерный профиль горизонтальных синусоидальных смещений

На Рис. 9а видно, что возможна ситуация, когда внутрь Фурье-фильтра попадает нулевая гармоника, и соответствующее смещение на Рис. 9б определяется неверно. В данном случае обрабатывалось синусоидальное смещение с амплитудой $A = 15$ пикс, и длиной волны 200 пикс. Период полос Фурье-фона 40 пикс. Соответственно, случай не нарушает ограничение (10) и имеет сравнительно небольшой градиент смещения 0.47пикс/пикс, но из-за неправильного выбора Фурье-фильтра обработка даёт недостоверный результат. Если уменьшить радиус круговых фильтров так, чтобы они не

пересекались, это приведет к ограничению на максимальный градиент смещения $\frac{1}{\sqrt{2}}$ пикс/пикс^[8]. При больших значениях градиента смещения часть размытого пика в Фурье-плоскости окажется вне зоны фильтра. Далее будет показано, что более удачный выбор формы фильтра позволяет получать достоверные значения смещения вплоть до градиента смещения 1 пикс/пикс. Это значение является теоретическим пределом для всех методов обработки изображений, поскольку в областях с таким градиентом смещения соседние детали фона могут накладываться друг на друга, что делает задачу правильного определения смещения неразрешимой.

Чтобы избежать включения внутрь области фильтра нулевой и второй гармоник, а также проблем с ограничением по градиенту смещения, можно вместо кругового фильтра использовать фильтр в виде секторов, как показано на Рис. 10а.

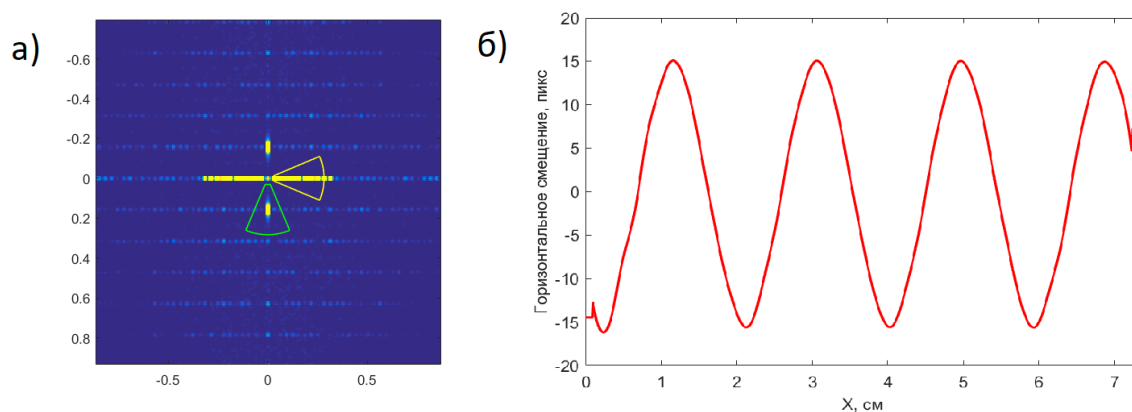


Рис. 10. а) Двумерное преобразование Фурье с использованием секторальных фильтров.
б) одномерный профиль горизонтальных синусоидальных смещений

Параметрами секторов в данном случае является минимальный радиус, составляющий 0.2 (от координаты вершины пика, т.е. f_0), максимальный радиус 1.8, угол (половина угла при вершине) 0.4 рад (примерно 23°). Обработка велась для аналогичного синусоидального смещения. Как видно из Рис. 10б, результат определения профиля смещений оказывается похожим на заданный синусоидальный.

Полученные результаты позволяют сказать, что при Фурье обработке существенную роль играет выбор правильного фильтра.

8 Моделирование реальных течений

8.1 Конвективное течение от нагреваемой проволоки

Для того, чтобы проверить точность работы Фурье метода по сравнению с кросс-корреляцией в условиях, приближённых к реальным, используется моделирование реальных течений. В частности, рассматривается конвективная струя, создаваемая линейным источником тепла — проволочкой, в резервуаре с водой. Для создания синтетического изображения ТФМ конвективного течения, вызванного проволокой, расположенной на глубине 6 см, используются результаты численного моделирования, выполненного Винниченко Н.А., — поле температуры, из которого по эмпирической зависимости $n(T)$ находится поле показателя преломления, затем из производной показателя преломления определяется поле смещений. Далее на основе полученных смещений создаются рабочие изображения для кросс-корреляционной обработки и Фурье метода, производится обработка изображений, определяются поля смещений, показателя преломлений и профиль температур. После обработки происходит сравнение полученных профилей смещений и температуры с известными значениями. Данный эксперимент помогает оценить пространственное разрешение методов, так как струя, рассматриваемая в данном моделировании, имеет ширину всего 3-4 мм, и горизонтальный градиент горизонтального смещения вблизи проволоки достигает больших значений, что видно из Рис.11.

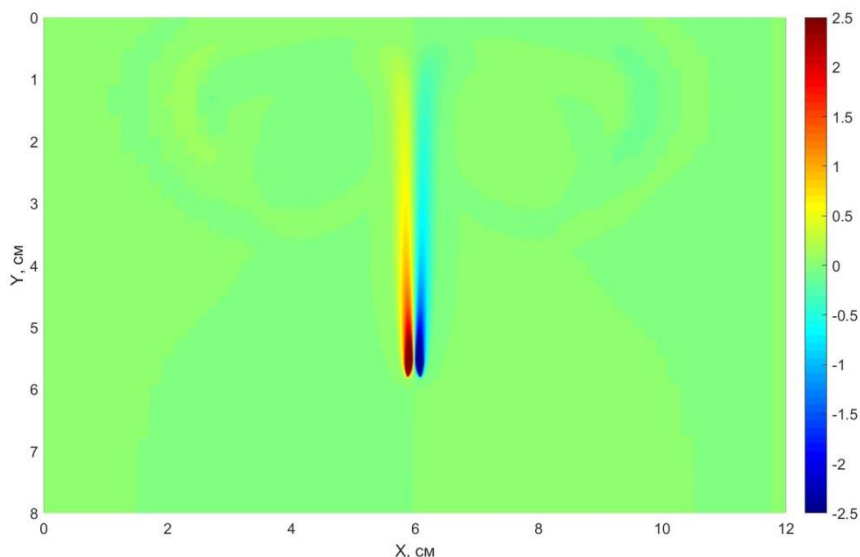


Рис. 11. Известное поле горизонтальных смещений (пикс) из моделирования конвективной струи.

В моделируемом эксперименте температура не нагретой среды составляет $23.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, расстояние от фона до потока 4 см, от камеры до потока — 1 м. Размер области моделирования 12х8 см, длина проволоки 11 см. Нагретая жидкость всплывает вверх, сталкивается с границей раздела сред вода-воздух, образуется пара вихрей, расходящихся в стороны. Получаемое поле горизонтальных смещений в этом случае представлено на Рис. 11, поле температур — на Рис. 12.

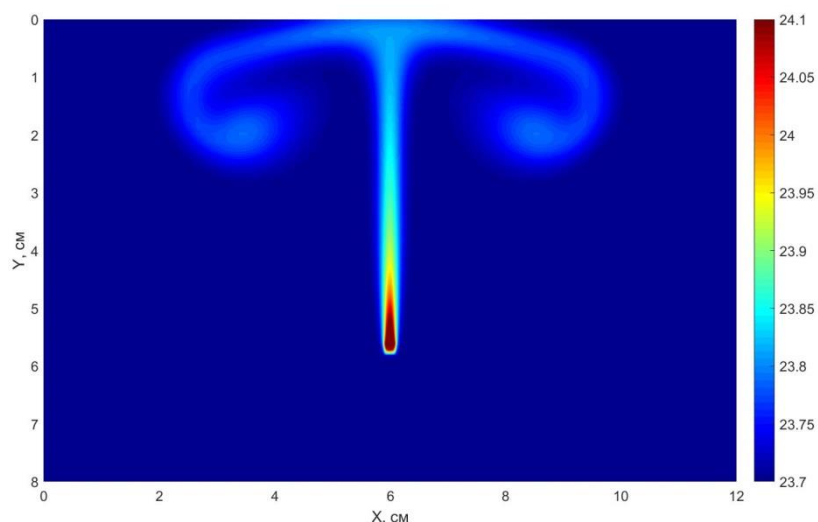


Рис. 12. Известное поле температур ($^{\circ}\text{C}$) из моделирования конвективной струи.

Для определения смещений используется трёхпроходный кросс-корреляционный алгоритм с областью опроса 32х32 пикс и наложениями

4x4пикс, а также Фурье метод с периодом полос 10 пикс с секторальным фильтром. В результате получаются значения горизонтальных смещений (Рис. 13) и температур (Рис. 15).

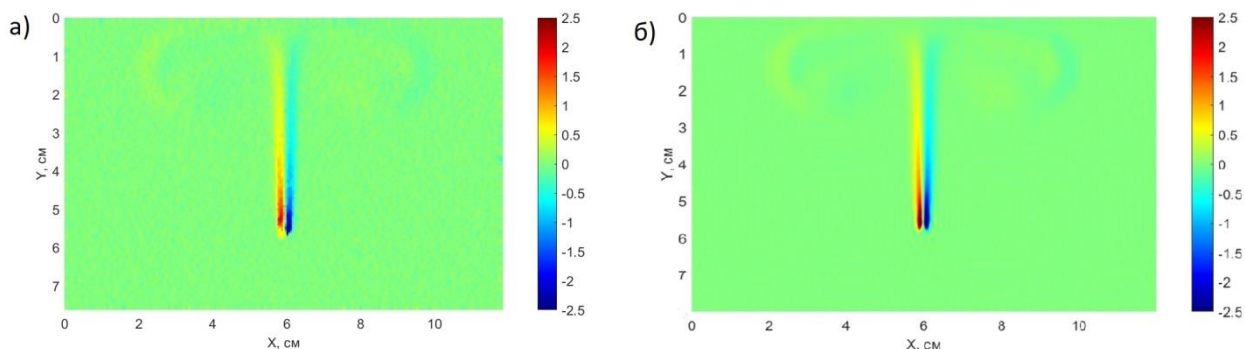


Рис. 13. Поле горизонтальных смещений (пикс) для конвективной струи, определенное с помощью а) кросс-корреляционного метода б) Фурье метода

Для данных изображений на Рис. 13аб можно заметить, что смещения над проволокой в случае кросс-корреляционной обработки определены более грубо, так как результат менее выражен по сравнению с Фурье методом. Если посмотреть на этот же профиль смещений в одномерном представлении (Рис. 14), можно в этом убедиться.

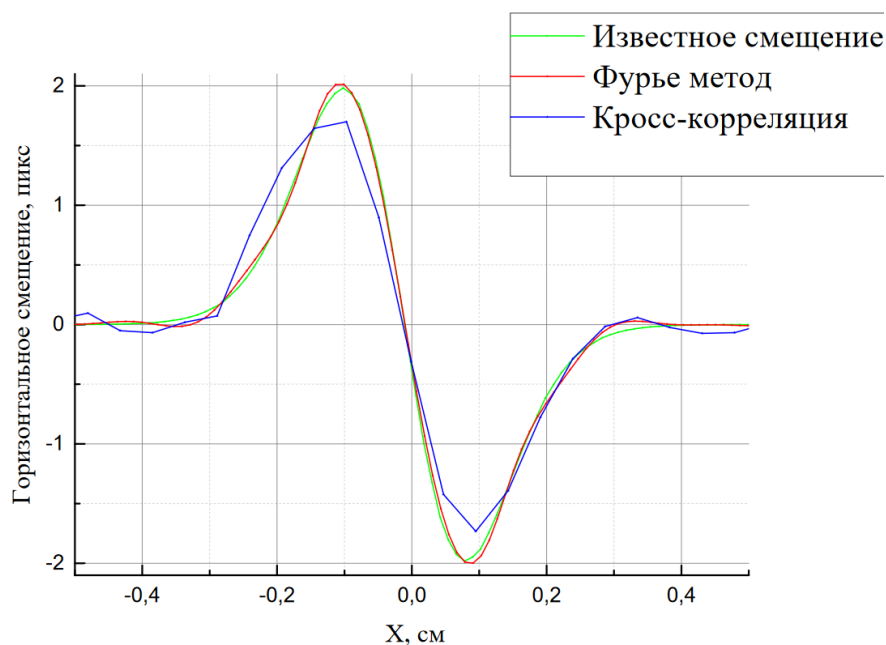
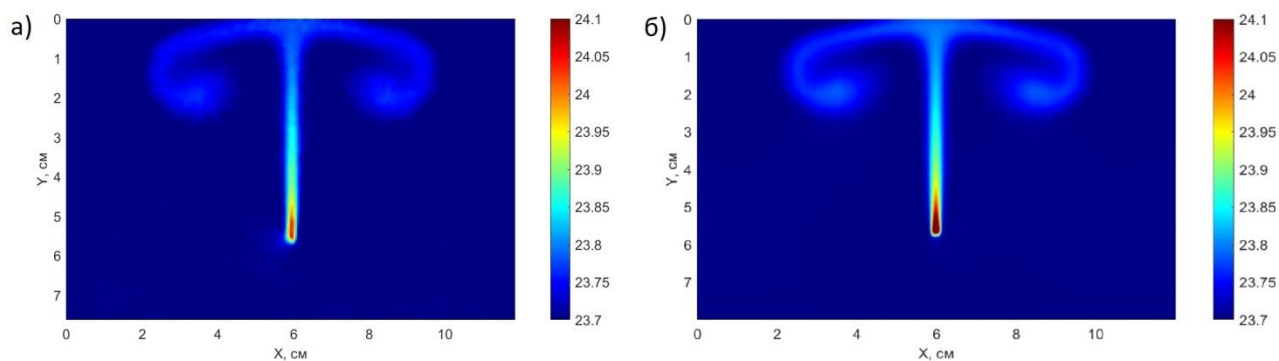


Рис. 14. Одномерные горизонтальные профили горизонтальных смещений для конвективной струи на глубине $y=5\text{см}$

График горизонтальных смещений, определенный с помощью Фурье метода, практически полностью повторяет график истинных смещений и

достигает максимума смещений 2пикс и минимума смещений -2пикс. Для графика, полученного с помощью кросс-корреляционного метода, видны некоторые различия. Максимальное значение графика 1.7пикс, минимальное — -1.7пикс. При этом вне экстремумов можно наблюдать некоторые отклонения, обусловленные особенностями работы кросс-корреляционного метода. В дальнейшем это также приводит к менее точному определению температуры, что и показано далее.



*Рис. 15. Поле температур ($^{\circ}\text{C}$) для конвективной струи, определенное с помощью
а) кросс-корреляционного метода б) Фурье метода*

На Рис. 15 представлены полученные двумя методами поля температур. На них видно, что в случае с кросс-корреляцией профиль получается более зашумленным, если обратить внимание на часть изображения под проволокой или вблизи вихрей. Для Фурье эти шумы отсутствуют и график более схож с графиком известной температуры. Также можно заметить, что температура воды непосредственно над проволокой определена менее точно в первом случае. Это лучше видно, если рассмотреть одномерный профиль температуры на Рис. 16.

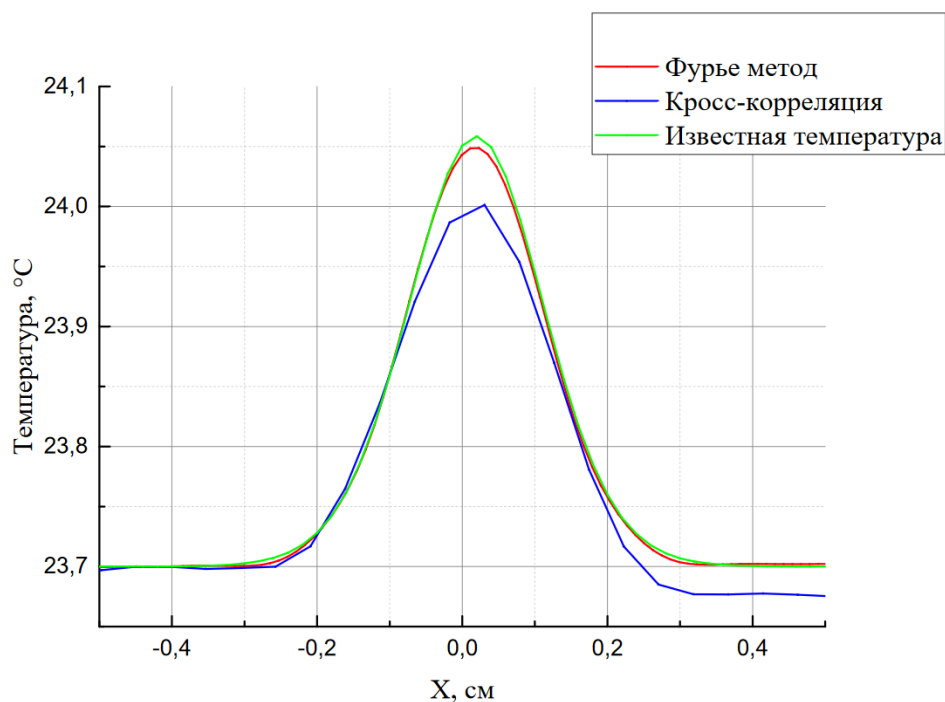


Рис. 16. Одномерные горизонтальные профили температуры ($^{\circ}\text{C}$) для конвективной струи на глубине $y=5\text{ см}$

График температуры (Рис.16), определенной в результате Фурье обработки, практически полностью повторяет график для известных значений, достигая максимума в точке $24.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как для кросс-корреляции пик находится ниже истинных значений, имея максимум в точке $24.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также выход на температуру невозмущенной среды $23.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ у синего графика более грубый, что наблюдается на двумерном поле в виде шумов.

8.2 Диффузионный слой в водно-спиртовом растворе

Ожидается, что пространственное разрешение позволит Фурье методу измерить профили массовой доли при большой начальной разности концентраций, приводящей к образованию тонких слоев с очень большими градиентами рефракционного смещения. Для этого моделируется диффузионный слой. Аналитически задается одномерный профиль концентрации – из решения уравнения диффузии. Из концентрации получается поле показателя преломления, а из его производной – поле смещений. Аналогично предыдущему подпункту, смещения используются для создания рабочих фонов для обработки обоими методами. Далее приводятся сравнения полученных результатов.

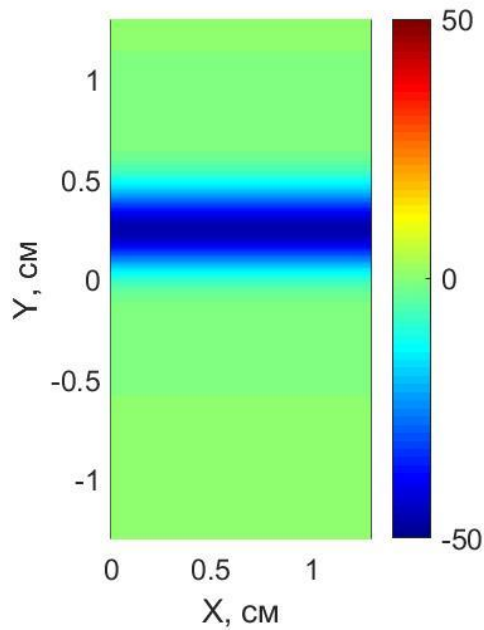


Рис. 17. Известное поле вертикальных смещений из моделирования диффузионного слоя (пикс)

В моделируемом эксперименте снизу находится вода — сверху 40% спирта, расстояние от фона до потока 2см, от камеры до потока — 58см. Размер объекта 1.3x2.6см, толщина объекта 1.2см. Получаемое поле вертикальных смещений представлено на Рис. 17, двумерное поле массовой доли — на Рис. 18.

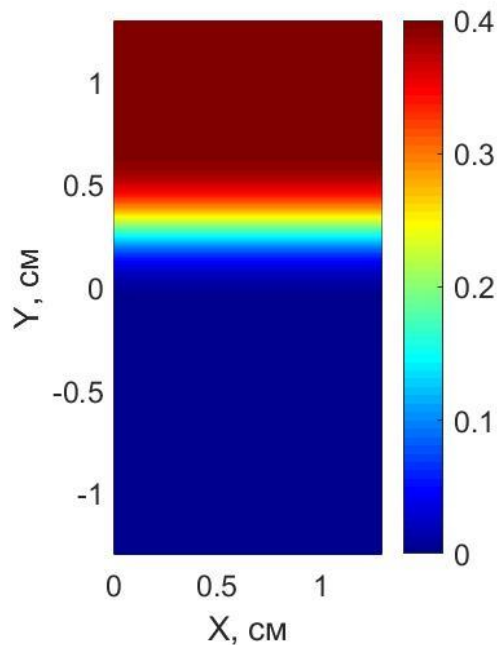


Рис. 18. Известное поле массовой доли спирта в диффузионном слое

Для кросс-корреляции выбирается двухпроходный алгоритм с размером областей опроса 64x16 и наложениями 8x2пикс. Это обусловлено

тем, что вертикальные смещения испытывают сильный скачок и требуют лучшего пространственного разрешения, так как вертикальный градиент смещения в данном примере достигает 0.97 пикс/пикс. Параметры выбраны таким образом, чтобы вертикальная протяженность области опроса позволяла снизить влияние такого большого градиента смещения, а за счёт большого горизонтального размера достигается необходимое для работы алгоритма число пятен. Для Фурье обработки используется фон с периодом полос 10 пикс и секторальные фильтры. В результате получаются значения вертикальных смещений (Рис. 19) и температур (Рис. 21).

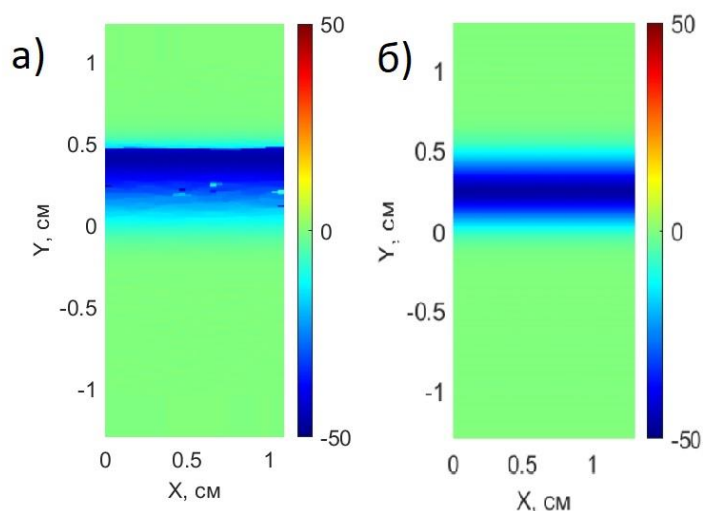


Рис. 19. Поля вертикальных смещений (пикс) в диффузионном слое, определенные с помощью а) кросс-корреляции б) Фурье метода

Из данных изображений (Рис. 19аб) видно, что смещения в случае с Фурье методом получены более точно, так как в профиле, найденном с помощью кросс-корреляции видны “рваные” скачки смещений. Это можно увидеть и в одномерном виде на Рис. 20.

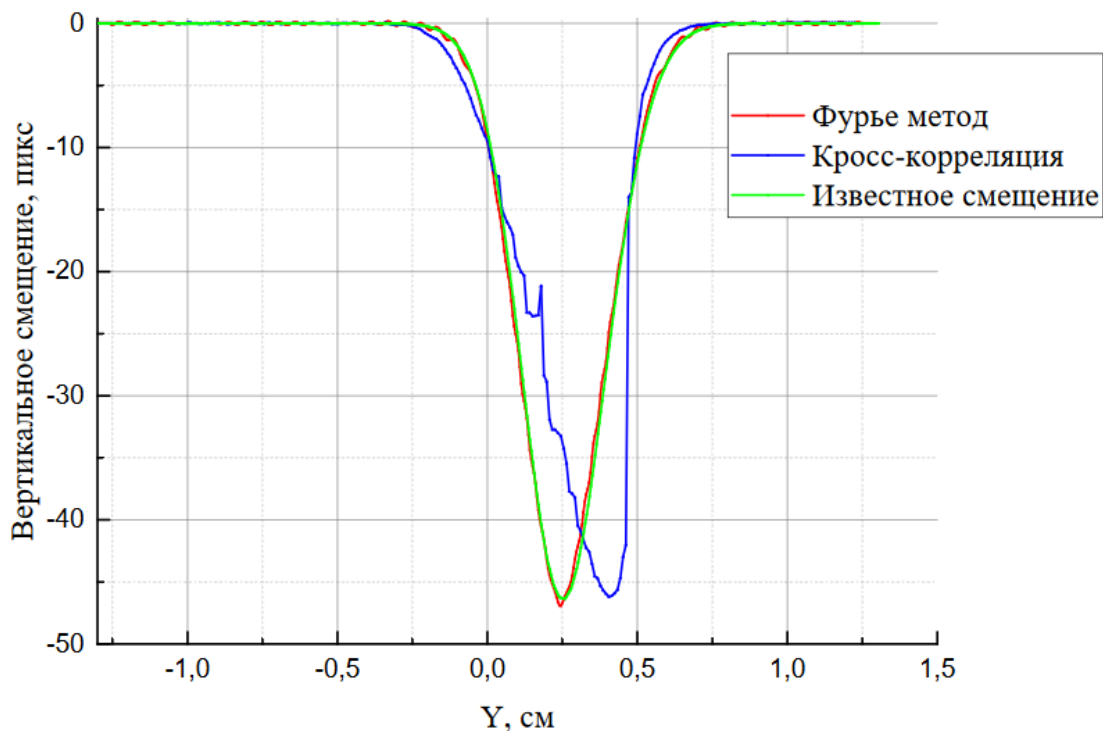


Рис. 20. Одномерные вертикальные профили вертикальных смещений (микс) в диффузионном слое

Кроме скачков, можно заметить, что пик смещений кросс-корреляция, в отличие от Фурье метода, который хорошо соответствует с известным смещением, определила неточно, сместив его на 0.15см вправо. Это сказывается и на дальнейшем определении массовой доли.

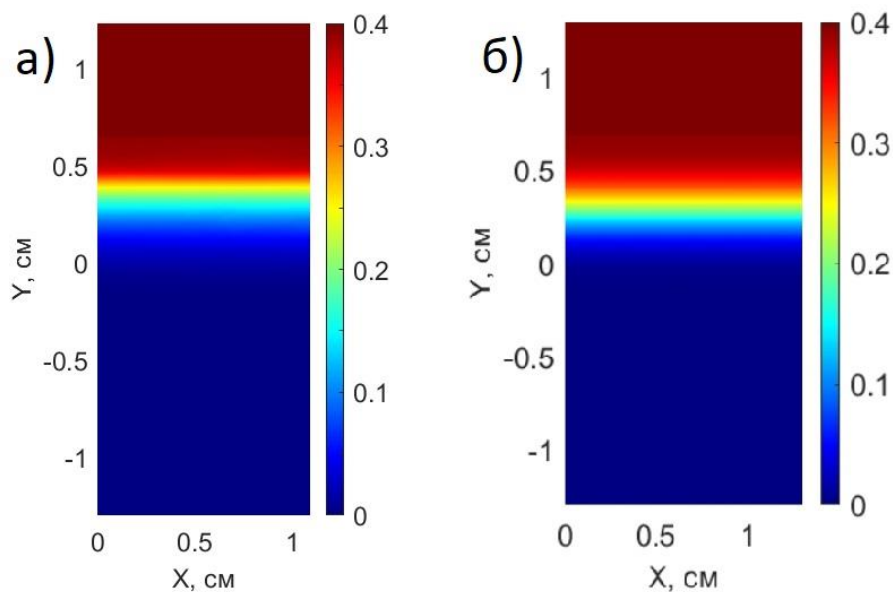


Рис. 21. Поля массовой доли спирта, определенные с помощью а) кросс-корреляции б) Фурье метода

На первый взгляд кажется, что оба графика на Рис.21 одинаковы, но если построить одномерный график, можно увидеть разницу (Рис.22). Видно, что в слое, где непосредственно происходит диффузия, кривая для кросс-корреляционного метода оказывается несколько сдвинутой от известного смещения и смещения, найденного Фурье методом.

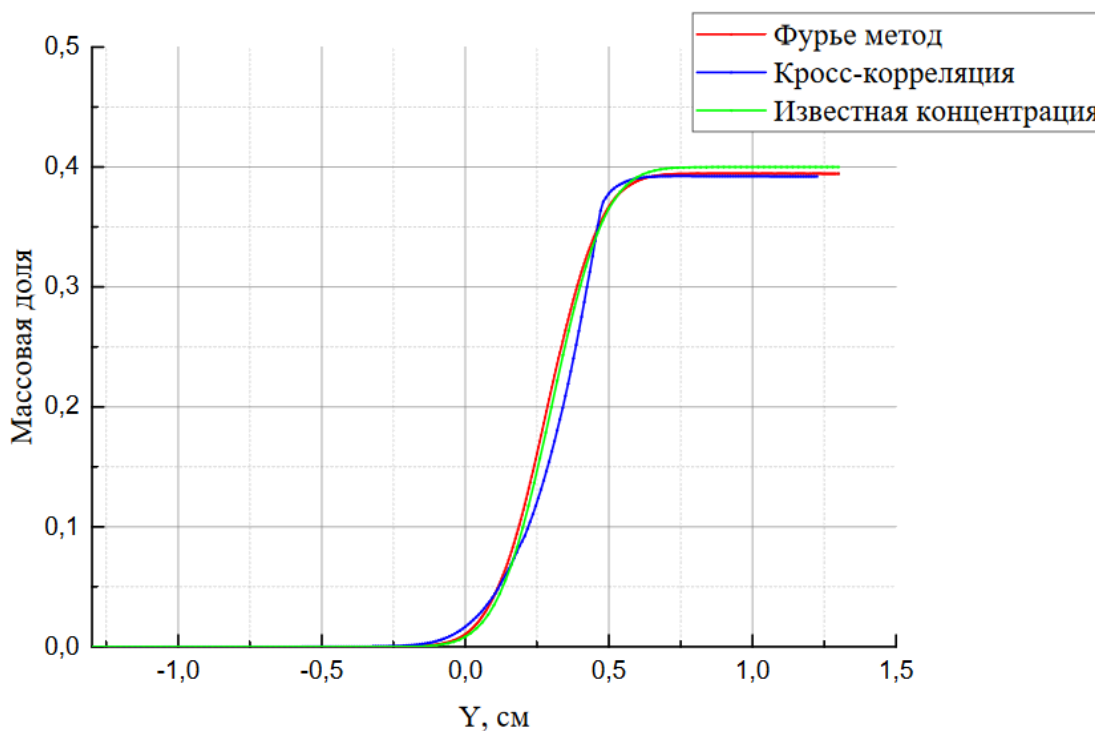


Рис.22. Одномерные вертикальные профили массовой доли спирта в диффузионном слое

Таким образом, были показаны преимущества Фурье метода по сравнению с кросс-корреляцией при моделировании реальных течений. Лучшее пространственное разрешение позволяет исследовать течения с большими градиентами смещений.

9 Реальный эксперимент

Метод был опробован для реального течения с диффузионным слоем. В эксперименте в кювету наливают 30%-ный раствор спирта, затем на дно с помощью шприца наливают воду, так получается более ровная и резкая граница раздела. Фон отображался на экране монитора LG 24UD58-B с разрешением 3840x2160 —это примерно 74 пикс/см, что позволяет создать фон с небольшим периодом (10 пикс на мониторе это примерно 30 пикс на снимке). Расстояние от фона до кюветы 1см, от камеры до потока — 58см.

Размер кювета 10x10x1.3см. Чтобы спирт меньше испарялся, кювета закрыта сверху крышкой. Рабочий снимок производится примерно через минуту после наливки жидкостей. Затем жидкость аккуратно перемешивается стеклянной палочкой, иначе диффузия продолжалась бы порядка месяца. Опорный снимок производится спустя несколько часов после этого.

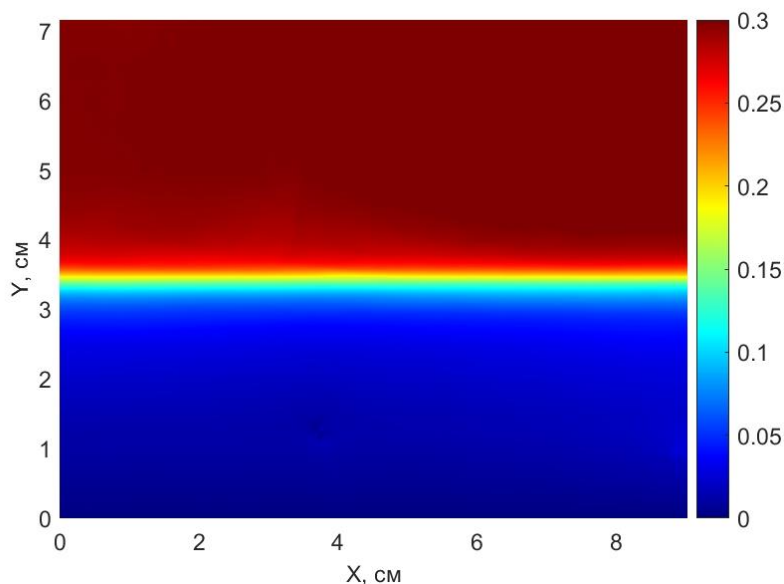


Рис.23. Поле массовой доли спирта.

В результате Фурье обработки было получено поле массовой доли спирта (Рис. 23). Задавая при решении уравнения Пуассона только долю спирта внизу (нулевую), мы определяем массовую долю спирта во всей области измерения. Полученная массовая доля спирта вверху при этом близка к 0.3, что соответствует налитому раствору, это также хорошо видно на одномерном вертикальном профиле (Рис. 24).

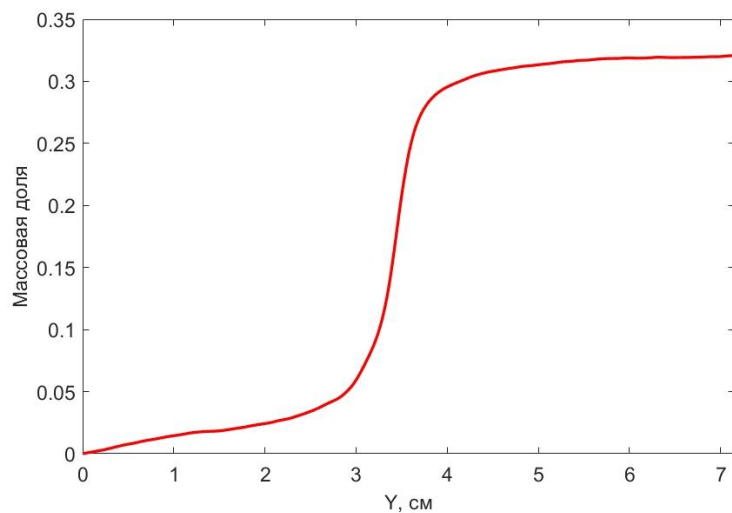


Рис.24. Вертикальный профиль массовой доли спирта.

Массовая доля при этом близка к 0.3, что соответствует налитому раствору, это также видно на одномерном вертикальном профиле (Рис.24). Величина максимального градиента смещения при этом составляет 0.36пикс/пикс.

10 Основные результаты и выводы

В работе был реализован и протестирован на синтетических изображениях, а также на изображениях, полученных в реальном эксперименте по диффузии в водно-спиртовом растворе, способ определения смещений в теневом фоновом методе, основанный на использовании фонов, состоящих из периодических полос, и Фурье-обработки, заимствованной из интерферометрии. 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. Это позволяет проводить ТФМ измерения для течений жидкости с большим перепадом температур и концентраций, что и было показано в настоящей работе на примере обработки синтетических изображений, созданных по данным моделирования реальных течений, а также на примере изображений из реального эксперимента.

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, обеспечивающий лучшее пространственное разрешение. 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).

11 Литература

1. G.E.A. Meier. Computerized background-oriented schlieren // *Exp. Fluids*, Vol. 33, pp. 181–187, 2002.
2. M. Raffel. Background-oriented schlieren (BOS) techniques // *Exp. Fluids*, Vol. 56, 60, 2015.
3. J. Westerweel. On velocity gradients in PIV interrogation // *Exp. Fluids*, Vol. 44, pp. 831-842, 2008
4. M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes // *Appl. Opt.*, Vol. 22, №24, pp. 3977-3982, 1983.
5. A. Blanco, B. Barrientos, C. Mares. Performance comparison of background-oriented schlieren and fringe deflection in temperature measurement: part I. Numerical evaluation // *Opt. Eng.*, Vol. 55, №5, 054102, 2016.
6. N.A. Vinnichenko, A.V. Uvarov, Y.Y. Plaksina. Accuracy of Background Oriented Schlieren for different background patterns and means of refraction index reconstruction // *The 15th International Symposium on Flow Visualization (ISFV-15)*. 2012. Minsk, Belarus. p. 81, ISFV15-086, pp. 1-15.
7. F. Scarano, M.L. Riethmuller. Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset // *Exp. Fluids*, Vol. 26, pp. 513-523, 1999.
8. S. Wildeman. Real-time quantitative Schlieren imaging by fast Fourier demodulation of a checkered backdrop // *Exp. Fluids*, Vol. 59, 97, 2018.